



UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA  
DEPARTAMENTO DE EDAFOLOGÍA Y QUÍMICA AGRÍCOLA  
FACULTAD DE BIOLOGÍA

***I******NFLUENCIA DE LOS FACTORES DE FORMACIÓN Y USO DEL SUELO EN***  
***LAS PROPIEDADES ÁNDICAS, FORMAS Y MECANISMOS DE***  
***ESTABILIZACIÓN DE CARBONO EN SUELOS DEL NOROESTE DE LA***  
***PENÍNSULA IBÉRICA***

***José Ramón Verde Vilanova***

**Fdo.: José Ramón Verde Vilanova**  
*Santiago de Compostela, Junio 2009*





**D. Felipe Macías Vázquez**, Catedrático del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología perteneciente a la Universidad de Santiago de Compostela, y **Dña. Marta Camps Arbestain**, Profesora Titular del Instituto de Recursos Naturales de la Universidad de Massey, en Nueva Zelanda,

**CERTIFICAN:**

Que el presente trabajo titulado “*Influencia de los factores de formación y uso del suelo en las propiedades ándicas, formas y mecanismos de estabilización de Carbono en suelos del noroeste de la Península Ibérica*”, que para optar al grado de Doctor en Biología presenta **D. José Ramón Verde Vilanova**, ha sido realizado bajo nuestra dirección y supervisión en los laboratorios del Departamento de Edafología de la Facultad de Biología (Universidad de Santiago de Compostela).

Considerando que representa trabajo de Tesis Doctoral, autorizamos su presentación ante la Comisión de Doctorado de la Universidad de Santiago de Compostela.

Y para que así conste, expedimos el presente certificado en Santiago de Compostela a 09 de Junio de 2009.

Fdo. Dr. Felipe Macías Vázquez

Fdo. Dra. Marta Camps Arbestain



## ***AGRADECIMIENTOS.***

En primer lugar, quisiera dar las gracias a mis directores Dr. Felipe Macías y Dra. Marta Camps por toda la atención y la inestimable ayuda y que me han prestado, sin la cual no hubiera sido capaz de realizar este trabajo.

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación, durante dos años y medio, de la beca predoctoral concedida por la *Consellería de Innovación, Industria y Comercio* de la *Xunta de Galicia*, cofinanciada por el *Programa Operativo Integrado de Galicia (F.S.E.) de la Unión Europea* y a diversos proyectos de investigación, durante el tiempo restante, adjudicados al Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología bajo la dirección del Dr. Felipe Macías. La estancia en la Universidad holandesa de Wageningen ha sido posible gracias a la beca financiada por la Comunidad Europea en el marco del *Programa ERASMUS* además de por los fondos adicionales nacionales adoptados por la Dirección General de Enseñanza Superior del Ministerio de Educación y Ciencia y de la Universidad de Santiago de Compostela.

Por otra parte, quisiera agradecer a todos los integrantes del Departamento de Edafología y Química Agrícola, profesores, técnicos de laboratorio y demás familia, toda la ayuda que me prestaron en las múltiples fases de este trabajo y por los buenos momentos que me hicieron pasar en el largo tiempo que aquí pasé.

Gracias también a la familia de Químicos que tenemos como vecinos en el Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Sarita, Rocío, Dorita, Juan, Anita, Silvia... comandados como no por el Gran Capitán Florencio, por su gran ayuda, mejores consejos y por supuesto por su amistad. Y digo familia porque no se puede decir otra cosa, pues nunca he visto un grupo de investigación tan unido como éste. Sois la caña.

Por supuesto, gracias también a todos mis compañeros del Laboratorio de Tecnología Ambiental por la estupenda amistad que me une a ellos y por aguantar como jabatos mis desbarres mentales (por no decir lo que estáis pensando) y mis cambios de humor, sobre todo ahora que se termina la aventura. Sois los mejores compañeros que uno puede desear.

Una mención especial para el profesor de la Universidad holandesa de Wageningen Dr. Peter Buurman por su grandísima labor como director del trabajo que realicé durante mi estancia en Holanda y por soportar heroicamente el tortuoso camino durante mis primeros días en su hermoso país. Un gran investigador, una excelentísima persona y por supuesto un mejor amigo al que siempre recordaré con cariño.

En último lugar, y no por ello menos importante, quisiera agradecer a mis padres todo el esfuerzo que han realizado para que yo pudiese estar donde estoy. Sin ellos nada de esto hubiera sucedido y por ello *GRACIAS*.

Si hoy me preguntasen que cambiaría si volviese a comenzar... mi respuesta sería clara y concisa: *“NADA”*.



A mis padres



# Índice

---





Capítulo		Pág.
Capítulo 1	EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO Y CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE ANDOSOLES.	7
	1.- Concepto de Andosol.	9
	2.- Propiedades físicas químicas y mineralógicas de los suelos ándicos.	13
	3.- Evolución taxonómica de los Andosoles.	18
	3.1.- Evolución de los criterios de clasificación de Andisoles en la Soil Taxonomy ( <i>Soil Survey Staff, USDA</i> ).	19
	3.2.- Evolución de los criterios de clasificación de Andosoles en la World Reference Base ( <i>FAO</i> ).	22
	4.- Los suelos ándicos en España.	25
	4.1.- Regiones volcánicas de la Península Ibérica.	26
	4.2.- Región volcánica de las Islas Canarias.	30
	5.- Bibliografía.	33
Capítulo 2	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.	57
	1.- Justificación.	59
	2.- Objetivos.	62
	3.- Bibliografía	65
Capítulo 3	VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y MINERALÓGICAS EN SUELOS DESARROLLADOS SOBRE MATERIALES BÁSICOS Y ULTRABÁSICOS EN EL NOROESTE PENINSULAR. RELACIÓN CON LA CLASIFICACIÓN DE ANDOSOLES.	69
	Resumen.	71
	1.- Introducción.	73
	2.- Material y Métodos.	74
	2.1.- Descripción del área de estudio.	74
	2.1.1.- Geología.	76
	2.1.2.- Clima.	79
	2.1.3.- Vegetación.	84
	2.2.- Toma de muestras y caracterización de los suelos estudiados.	86
	3.- Resultados y Discusión.	89
	3.1.- Descriptivas de Perfiles.	89
	3.2.- Caracterización de los suelos estudiados.	155
	3.3.- Fraccionamiento de las formas de Carbono.	159
	3.4.- Mineralogía de Suelos.	167
	3.4.1.- Mineralogía de Suelos sobre Anfíbolitas.	167
	3.4.2.- Mineralogía de Suelos sobre rocas serpentinizadas.	169
	3.4.3.- Mineralogía de Suelos sobre Granulitas.	171

	Pág.
<b>Capítulo 3</b>	
3.4.4.- Mineralogía de Suelos sobre Gabros.	173
3.4.5.- Mineralogía de Suelos sobre Gneis.	174
3.4.6.- Mineralogía de Suelos sobre materiales esquistosos.	175
3.5.- Propiedades Ándicas y Clasificación de Suelos.	176
4.- Conclusiones.	189
5.- Agradecimientos.	191
6.- Bibliografía.	193
Anexo 1.- Principales propiedades físico-químicas de los suelos estudiados.	205
Anexo 2.- Relaciones Al y Si.	211
Anexo 3.- Capacidad de Intercambio de cationes.	217
Anexo 4.- Mineralogía de la fracción arcilla.	223
<b>Chapter 4</b>	<b>EXPRESSION OF ANDIC SOIL PROPERTIES IN SOILS FROM GALICIA (NW SPAIN) UNDER FOREST AND AGRICULTURAL USE. FIELD STUDY. 241</b>
Summary.	243
1.- Introduction.	245
2.- Material and Methods.	246
3.- Results and discussion.	247
3.1.- Some chemical properties of the AGR and the FOR soils.	247
3.2.- Soil mineralogy of the AGR and the FOR soils.	252
3.3.- Soil use and changes in andic soil properties and soil classification.	256
4.- Conclusions.	257
5.- Acknowledgments.	258
6.- References.	259
<b>Chapter 5</b>	<b>INFLUENCE OF AGRICULTURAL PRACTICES OF ORGANO-ALUMINIC COMPLEXES IN AN ALU-ANDIC ANDOSOL: A LABORATORY STUDY 263</b>
Summary.	265
1.- Introduction.	267
2.- Material and Methods.	268
2.1.- Experimental Design.	268
2.2.- Chemical Determinations.	269
2.3.- Geochemical Modelling of Leachates.	269
2.4.- Statistical Analysis.	269

	Pág.
<b>Chapter 5</b>	
3.- Results.	270
3.1.- Soil Chemical Characterization at the end of the experiment.	270
3.2.- Chemical Characterization of Leachates.	272
4.- Discusión.	275
4.1.- Interactions between pH, Al and MO.	275
4.2.- $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ y $\text{NO}_3^-$ behaviour.	276
4.3.- Mineral Stability.	277
5.- Conclusions.	279
6.- Acknowledgements.	280
7.- References.	281
Annex.- Database used in the Geochemical Modelling of Leachates.	287
<b>Chapter 6</b>	
<b>NaOH-EXTRACTABLE ORGANIC MATTER OF ANDIC SOILS FROM GALICIA (NW SPAIN) UNDER DIFFERENT LAND USE REGIMES: A PYROLYSIS GC/MS STUDY</b>	<b>297</b>
Summary.	299
1.- Introduction.	301
2.- Material and Methods.	302
2.1.- Description of sampling sites.	302
2.2.- Extraction and Purification of SOM.	305
2.3.- Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Py-GC/MS).	305
2.4.- Statistical Analysis.	305
3.- Results and Discussion.	306
3.1.- Main pyrolysis products.	306
3.1.1.- Aliphatics.	306
3.1.2.- Fatty acids.	307
3.1.3.- Lignins and Phenols.	308
3.1.4.- Polysaccharides.	310
3.1.5.- N-Compounds.	314
3.1.6.- Aromatics and Polycyclic Aromatics.	315
3.2.- Factor Analysis.	316
3.2.1.- Complete data set.	317
3.2.2.- Recent soils alone (Reduced data set).	319
4.- Conclusions.	325
5.- Acknowledgments.	326
6.- References.	327

	Pág.
Capítulo 7	
FINAL CONCLUSIONS	333
1.- Final Conclusions.	335

# Capítulo 1

---

*Evolución del Concepto y Criterios de Clasificación  
de Andosoles*



# Capítulo 1



V.V. Dokuchaiev (1846 – 1903)

## Evolución del Concepto y Criterios de Clasificación de Andosoles.

---

### 1. Concepto de Andosol

A raíz de la presentación, en el año 1883, de la Tesis Doctoral de **Vassili Vassilievith Dokuchaiev** (1846 – 1903), titulada “*El Chernozem ruso*”, se empieza a desarrollar como tal, de forma constante y continuada hasta la Segunda Guerra Mundial, lo que hoy se conoce como Ciencia del Suelo, aunque ya **Justus von Leibeg** (1803 – 1873) había comenzado el estudio del suelo alrededor del año 1840, con la publicación de su obra “*Química en relación con la agricultura y el crecimiento de las plantas*”.

A partir de este momento comienza la carrera hacia el desarrollo de la Ciencia del Suelo en la que hombres como **Nikolai Mikhailovitch Sibirtzev**, que introdujo los términos iniciales de zonalidad, intrazonalidad y azonalidad (base de muchas clasificaciones hasta 1960), **Konstantin Dimitrievich Glinca**, fundador de la “*International Society of Soil Science*” (Roma, 1924), **Curtis Fletcher Marbut**, autor de uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos (1924), que lleva su nombre, y de la obra “*The Soils of the United States*”, **Cline** (1979) y **Simonson** (1987), por sus avances en los sistemas de clasificación y la cartografía de los suelos de Estados Unidos, **Baldwin, Kellog y Thorp**, por haber presentado en 1938 un nuevo sistema de clasificación de suelos basada en criterios de zonalidad climática y precursora de la “*Soil Taxonomy – USDA (1951)*” (ST) y el español **Huguet del Villar**, por la elaboración del primer Mapa de Suelos de Europa a escala 1:10.000.000 en 1927 y por la elaboración de un sistema de clasificación basada en la división del suelo en horizontes y teniendo en cuenta los caracteres más relacionados con el suelo y la vida vegetal que lo sustenta, entre otros, desarrollaron un papel fundamental.

Una mención especial a la labor de **Walter L. Kubiena**, que con la obra “*Micropedology*”, publicada en 1938, comenzó el estudio de la Micromorfología. En 1948 idea un sistema genético de clasificación muy utilizado en la década de los cincuenta. En 1952 publica “*Claves Sistemáticas de Suelos*”, donde trata el estudio

---

de la génesis y clasificación de suelos y que, posteriormente, ha servido de guía para la elaboración de clasificaciones genéticas de suelos elaboradas en Europa.

El término *Andosol* (del japonés “An”, oscuro, y “do”, suelo) se originó como resultado de las investigaciones realizadas en Japón por científicos americanos, entre los años 1945 y 1949, sobre suelos desarrollados sobre materiales de tipo volcánico (Baldwin y col., 1938) y fue acuñado por Simonson en el año 1947 en el marco del “Reconocimiento del Estado de los Suelos” celebrado en Japón (Simonson y Rieger, 1967; Simonson, 1979). En dichas investigaciones, se admitió que la inclusión de estos suelos, derivados de cenizas volcánicas, en cualquiera de los grupos de suelos presentes en los sistemas de clasificación existentes, era una cuestión bastante dificultosa.

En un primer momento tales suelos fueron denominados de múltiples maneras: *Brown forest soils*, *Black forest soils*, *prairie-like Brown forest soils*, *Black soils*, *Onji soils* y *volcanic ash soils*. Morfológicamente, estos suelos eran similares a los suelos de pradera (*Hapludoll*) y a los suelos pardos de bosque (*Eutrochrept*), aunque químicamente eran mucho más cercanos a los Podzoles, lo que creó una gran controversia en torno a la elección del término que se debería de utilizar para su designación.

El término *Ando soils* fue utilizado en nueve ocasiones durante el periodo comprendido entre 1948 y 1951, con posterioridad al reconocimiento del sistema de clasificación japonés (Austin, 1948), y apareció publicado por primera vez en el año 1949 (Thorp y Smith, 1949). En este grupo de suelos se incluyeron, inicialmente, todos los suelos que derivaban de cenizas volcánicas (Ritchie, 1951). A partir de este momento, este término fue muy utilizado entre 1960 y 1970 y se mantuvo como uno de los elementos constitutivos de los nuevos sistemas de nomenclatura, incluidos en los incipientes sistemas de clasificación de suelos, desarrollados por la FAO, dentro de su proyecto para la elaboración del Mapa Mundial de Suelos (FAO-Unesco, 1974), y la USDA, en la elaboración de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). En la leyenda del Mapa Mundial de Suelos (FAO-Unesco, 1974) se definen los Andosoles como suelos formados a partir de materiales volcánicos ricos en vidrio volcánico y con la presencia, generalmente, de un horizonte superficial oscuro. Por otra parte, en Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) estos suelos se incluyen dentro del Suborden Andepts de Inceptisoles y se definen como suelos de baja densidad aparente en los que hay cantidades apreciables de alofana y una alta capacidad de intercambio, o constituidos principalmente por materiales piroclásticos.

Desde la introducción del término Andosol en 1947 hasta la publicación de los modernos sistemas de clasificación (FAO-Unesco, 1974; Soil Survey Staff, 1975) existe un gran número de estudios realizados en diversos lugares sobre la distribución y propiedades de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos, generalmente asociados a zonas de gran actividad tectónica (Fig. 1), entre los que destacan los realizados sobre los suelos volcánicos de Japón (Yoshinaga y Aomine, 1962; Yamanaka y Yamada, 1964; Kawai, 1969), Korea (Shin, 1965), Kamchatka (Liverovskii, 1971), Alaska (Rieger y Wunderlich, 1960; Simonson y Rieger, 1967), Estados Unidos de América (Flach, 1965), México (Aguilera, 1969), America Central (Rico, 1965; McConaghy, 1969; Martini, 1969; Colmet-Daage y col., 1970; Alvarado y Buol, 1975), Ecuador (Colmet-Daage y col., 1967), Colombia (Luna, 1969), Perú (Zavaleta, 1969), Chile (Valdés, 1969), Argentina (Wright, 1965), Nueva Zelanda



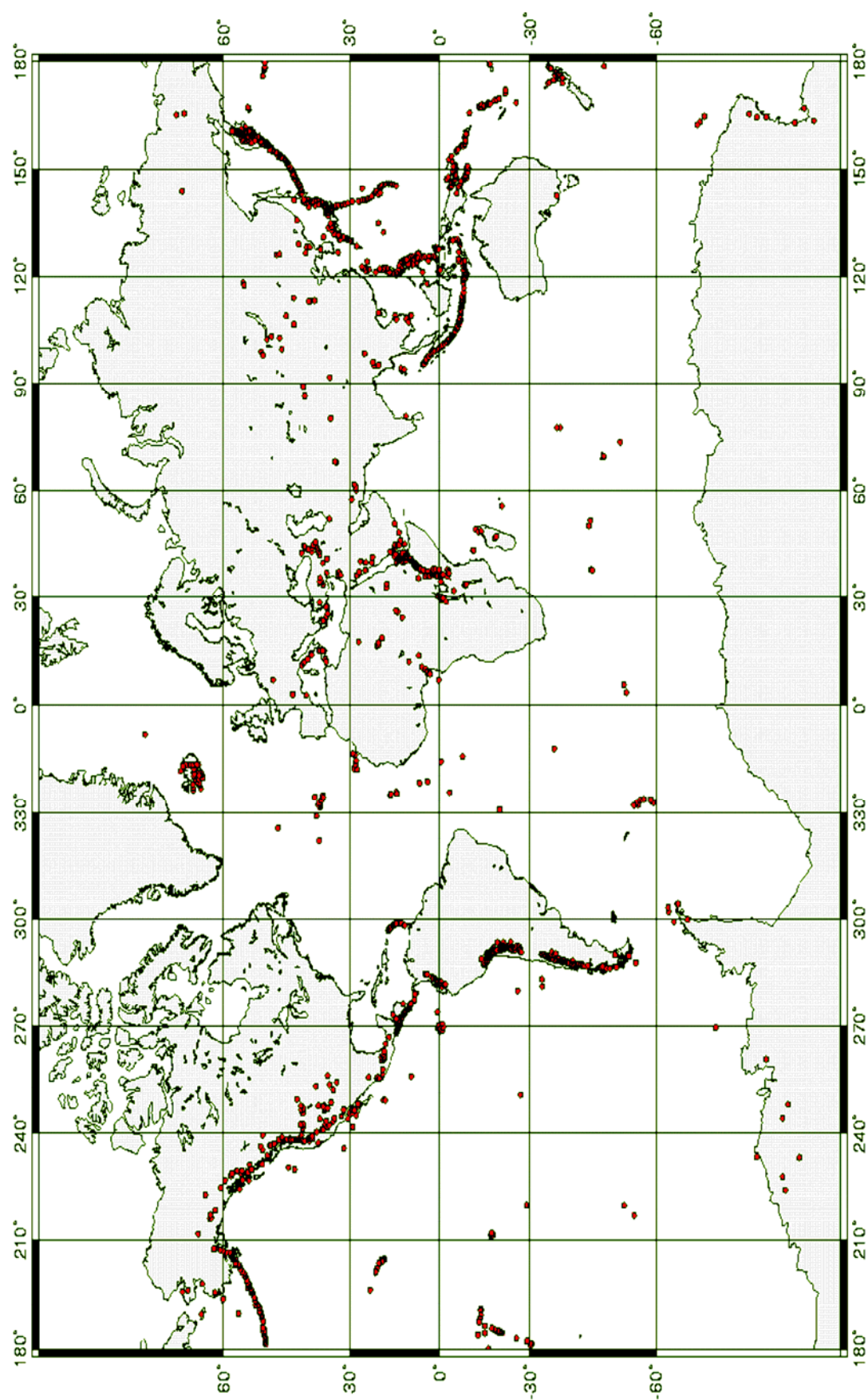


Figura 1.- Principales regiones volcánicas a nivel mundial (Sawyer y col., 2005).

(New Zealand Soil Bureau, 1968), Fiji (Twyford y Wright, 1965), Indonesia (Tan, 1965), Taiwan (Lai y Leung, 1967) Filipinas (Mariano, 1965), Hawaii (Swindale y Sherman, 1965), Francia (Duchaufour y Souchier, 1966) Nueva Guinea (Rutherford, 1962) Italia (Buondonno, 1964), etc.

Una de las primeras definiciones para el concepto de Andosol fue propuesta por **Smith** en 1978. Según este autor *los Andosoles se corresponden con suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas y pumitas, así como a partir de otro tipo de materiales arrojados por erupciones volcánicas y materiales piroclásticos, cuyas características principales son: i) presencia de un complejo de intercambio dominado por compuestos amorfos de Al, Si y humus; ii) ó presencia de una matriz dominada por vidrio volcánico; iii) y teniendo uno o más horizontes diagnóstico no coincidentes con un Ocric epipedon*. Esta primera aproximación está focalizada principalmente en el material de partida de origen volcánico y no define el concepto en términos de desarrollo de suelo, lo que dificultaba las interpretaciones a nivel de familia.

Una definición más precisa del concepto de Andosol, en la que ya se incluyen, además del material de partida, las propiedades resultantes de los procesos de formación de este tipo de suelos, fue propuesta por **Arnold** en 1988. Además de incluir propiedades, como reflejo de los factores de formación, se incluye la mineralogía como una de las características principales, de forma que su definición se basa principalmente en la *presencia de Al y Fe en minerales de bajo grado de orden, generados a partir de procesos de meteorización, entre los que se encuentran la alofana, imogolita, ferrihidrita y/o complejos Al-humus, así como en la baja densidad aparente o una cantidad específica de vidrio volcánico, propiedades que han de estar presentes en al menos 35 cm dentro de los 60 primeros cm superficiales*.

Suelos con estas características se han estudiado principalmente en aquellas zonas en las que existe o existió actividad volcánica (Fig. 1), como Japón (Tokashiki y Wada, 1975; Egawa, 1977; Wada y Higashi, 1976; Yamada, 1977; Wada, 1977; Wada y Gunjigake, 1979; Shoji y col., 1982), Indonesia (Tan, 1965; Conte y col., 1997; van Ranst y col., 2008), Costa Rica (Buurman y col., 1997, 2007), Nueva Zelanda (Parfitt y col., 1975; Parfitt, 1980; Parfitt y col., 1980; Parfitt y Henmi, 1980; Fox, 1980; Wada, 1980; Wilson, 1981; Parfitt y Wilson, 1985; ICOMAND, 1986; Singleton y col., 1989; Parfitt y col., 1983; Theng y col., 1986; Churchman y Tate, 1987; Parfitt, 1990; Tate y col., 1990; Hewitt, 1992; Perrot y Wise, 1993; Choudhary y Baker 1994; Powell y Hawke, 1995; Hewitt, 1998; Percival y col., 2000; Shepherd y col., 2001; Groenendijk y col., 2002), España (Fernández Caldas y Guerra Delgado, 1971; Gallardo y col., 1973; Fernández Caldas y Tejedor Salguero, 1975; Quantin y col., 1975, 1976 y 1977; Rodríguez Rodríguez, 1977; Fernández Caldas y Rodríguez Hernández, 1978; Quantin y col., 1978 a y b; Tejedor Salguero y col., 1978 a y b, 1979 y 1980; Fernández Caldas y col., 1979; Rodríguez Hernández y col., 1979; Fernández Caldas y col., 1981 y 1982; Fernández Caldas y Tejedor Salguero, 1987; Jahn, 1991; Arbelo, 2002; Armas-Espinel y col., 2003 y 2004; Rodríguez Rodríguez y col., 2006), Italia (Quantin y col., 1985; Lorenzoni y col., 1995; Scarciglia y col., 2007), Francia (Aran y col., 1998; Quantin, 2004), Islandia (Arnalds, 2004), Portugal (Auxtero y col., 2004, 2008), Estados Unidos (Mizota y van Reeuwijk, 1989), México (Campos Cascaredo y col., 2001), etc. Sin embargo, estudios posteriores han demostrado que estas propiedades pueden hallarse en materiales de partida no volcánicos, dando lugar a Andosoles no alofánicos (Iñiguez y Barragán, 1974; Shoji y Ono, 1978; Macías y col., 1978a y b; Puga, 1976;

Puga y col., 1978 a; Puga, 1982; Shoji y Fujiwara, 1984; Shoji y Otowa, 1988; Hunter y col., 1987; García-Rodeja y col., 1987; Clayden, 1989; Leamy y col., 1990). Como consecuencia de ello, el término de Andosol fue ampliado para englobar suelos desarrollados tanto a partir de depósitos de cenizas volcánicas, sobre todo en ambientes templados (Parfitt y Kimble, 1990; Shoji y col., 1993, 1996; Lowe, 1997), como desarrollados a partir de rocas básicas (gabros anfíbolitas y granulitas) (Macías y col., 1978a y b; García-Rodeja y col., 1987; Verde y col., 2005) e incluso sobre esquistos anfíbolíticos (Camps Arbustain y col., 2001). Así mismo, propiedades ándicas, o similares, pueden aparecer en estos materiales e incluso en rocas graníticas (García-Rodeja y Macías, 1983; Calvo de Anta y col., 1983; García-Rodeja y Macías 1984; García-Rodeja y col., 1984 y 1985; Macías y Calvo de Anta, 1992a y b y 2001; Calvo de Anta y Macías, 1993) durante los primeros estadios de la meteorización de estos materiales, bajo condiciones de clima húmedo y buen drenaje.

## 2. Propiedades Físicas, Químicas y Mineralógicas de los Andosoles

Los Andosoles (Fig.2), que representan entre el 0,76 y el 0,84% de la superficie terrestre total (Leamy y col., 1980; Leamy, 1984), presentan una serie de características que los hacen muy interesantes para su estudio, tanto desde el punto de vista ambiental como agronómico. Son suelos generalmente fértiles, pero pueden presentar problemas de disponibilidad de fósforo que minimizan el desarrollo de la vegetación en medios no fertilizados con vegetación espontánea (síndrome ándico) (Calvo de Anta, 1992 b).

La mayor parte de las características que definen a los suelos con propiedades ándicas están estrechamente relacionadas con la presencia de formas activas de Al y Fe, minerales de bajo grado de orden, como alofana, imogolita y ferrihidrita, y complejos organominerales estables formados entre el Al y los componentes orgánicos humificados (Martin y Haider, 1986; Aran y col., 2001). Todos ellos, productos muy reactivos resultantes de la rápida meteorización de los minerales de partida en las condiciones en las que se desarrollan este tipo de suelos. Por ello, Wada (1989) concluye que la tipología de estos materiales de bajo grado de orden depende, en gran medida, de las condiciones climáticas, el material de partida y del estado de meteorización.

El proceso de formación de suelo, en presencia de materiales fácilmente alterables y buenas condiciones de humedad y drenaje, y en fases iniciales de su desarrollo, se conoce por el término de **andosolización**. Este proceso se caracteriza básicamente por un *importante enriquecimiento de materia orgánica humificada, porosidad elevada con el consiguiente descenso de la densidad, un incremento de la capacidad de retención de agua y del grado de desarrollo de la estructura, así como por el aumento progresivo de la capacidad de retención de fosfatos y otros aniones de elevada relación q/r y de la formación de complejos organometálicos y minerales de bajo grado de orden*. Muchos Andosoles presentan propiedades físicas características como *untuosidad, tixotropía e incluso un comportamiento similar al de los fluidos (Hydrandeps)*,... Desde el punto de vista químico, lo más característico es la *elevada reactividad para los aniones, humus y compuestos orgánicos, la amplia variabilidad de su carga eléctrica superficial pH dependiente, un punto cero de carga a pH alto (generalmente > 6,0), una CIC muy elevada a pH > 7,0 y baja a valores inferiores y un alto contenido de formas reactivas de Al, Si-Al o Si extraíbles con pirofosfato sódico, oxalato amónico, sosa en frío, etc.*

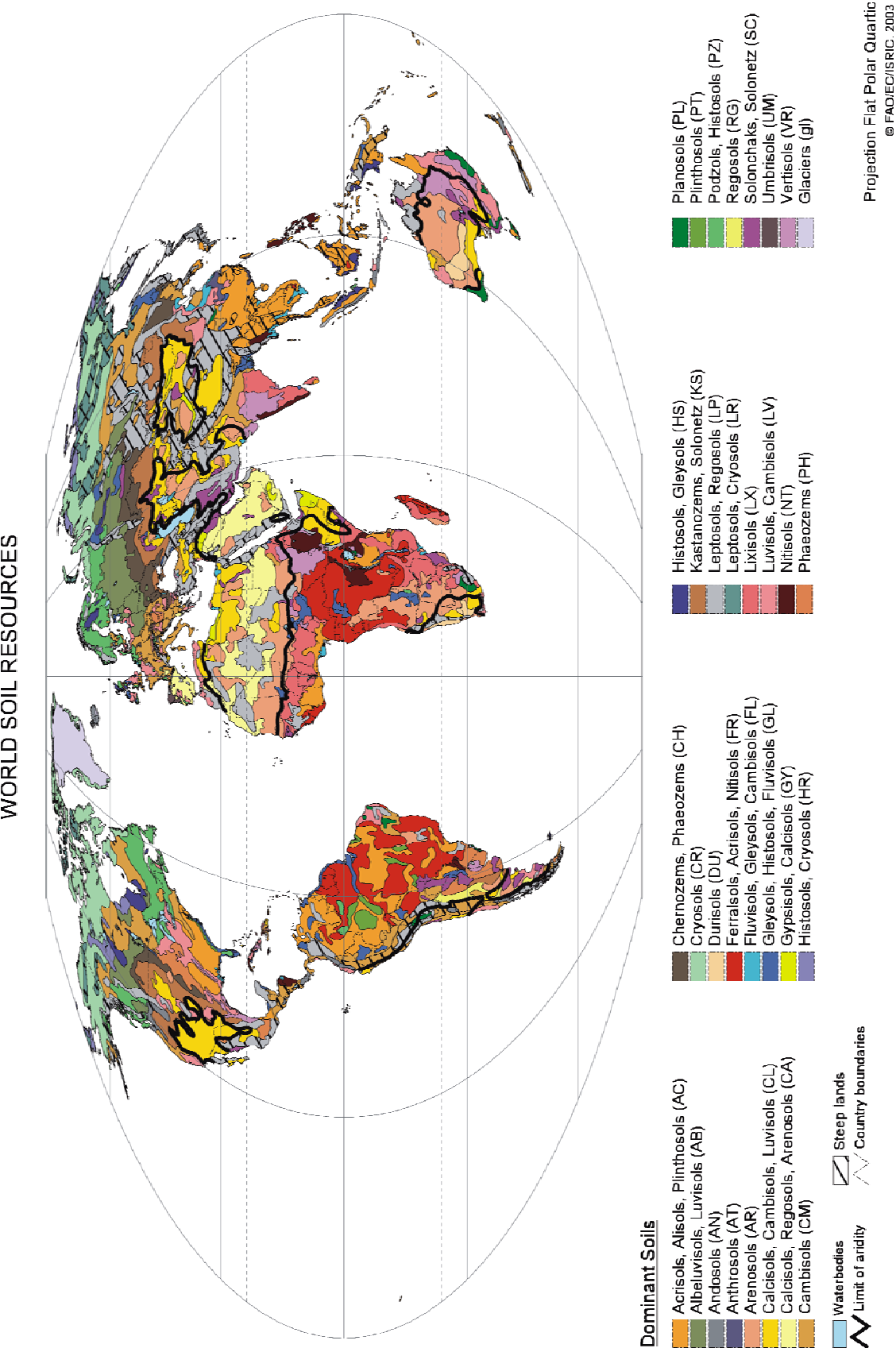


Fig. 2.- Mapa de los principales órdenes de suelos a nivel mundial (FAO, 2003).

Durante el proceso de andosolización, sobre todo en climas húmedos en los que los que se favorece la meteorización, se liberan grandes cantidades de Al, Fe y Si, susceptibles de reaccionar con los componentes orgánicos presentes en el suelo y entre sí, para dar lugar a minerales de bajo grado de orden, capaces a su vez de unirse a una cantidad adicional de componentes orgánicos mediante procesos de adsorción. La estabilización de formas de carbono, se debe a las fuerzas de atracción electrostática y procesos de absorción y/o adsorción, así como a la consiguiente formación de una microestructura granular que les confiere protección frente a los procesos oxidativos y a la acción microbiana (Buurman y col., 2007; González-Pérez y col., 2007), lo que favorece la acumulación de materia orgánica y explica su elevado tiempo de residencia (Boudot y col., 1989; Zech y col., 1997), que en algunas ocasiones puede oscilar entre 5.000 y los 30.000 años (Wada y Aomine, 1973; Torn y col., 1997). Sin embargo, diversas investigaciones han puesto de manifiesto que cambios en el tipo de uso y manejo de suelo, tienen un efecto negativo sobre las propiedades ándicas (Parfitt y col., 1997; Verde y col., 2005), causando una destrucción de los complejos Al-humus y un descenso, de hasta el 50 %, en la cantidad de carbono total del suelo (Verde y col., 2005). La gran cantidad de material orgánico presente en este tipo de suelos les confiere, generalmente en el horizonte superficial, un color muy oscuro.

La abundancia de compuestos minerales de bajo grado de orden y de complejos organominerales estables, junto con la baja cohesión y la buena agregación de los suelos ándicos, conduce a que éstos presenten una baja densidad aparente, generalmente inferior a  $0,9 \text{ kg dm}^{-3}$ , una gran capacidad de retención de agua, característica importante desde el punto de vista de producción vegetal, y que sean muy susceptibles a la degradación de su estructura cuando se hace uso de maquinaria pesada. Por otra parte, la alta porosidad está asociada a una elevada velocidad de infiltración y conductividad hidráulica lo que, en períodos de ausencia de lluvias y fuerte insolación, provoca la pérdida de gran parte del agua que se encuentra retenida, favoreciendo la condensación de los grupos hidrofílicos orgánicos para dar lugar a horizontes superficiales con un carácter fuertemente hidrofóbico (Puga, 1976; Rodríguez Rodríguez y col., 2002). En estas condiciones, con la llegada de las lluvias, independientemente de la intensidad de las mismas, comienza un proceso de movilización de agregados (altamente estables a la dispersión de agua) (Fig. 3), hacia las partes más bajas de la ladera, lo que provoca la aparición de episodios de erosión muy agresivos (Rodríguez Rodríguez y col., 2002). Tras episodios climáticos caracterizados por la presencia de lluvias especialmente abundantes, luego de la humectación del suelo, las propiedades físicas de los suelos ándicos – la gran velocidad de infiltración y la alta capacidad de retención de agua (hasta 300ml/100g) – hacen que la generación de escorrentía sea muy baja y provoca la aparición de episodios erosivos mediante un mecanismo de flujo laminar (*solifluxión*) (Fig.3) hacia las zonas bajas de la ladera (Rodríguez Rodríguez y col., 2002).

La retención de fosfatos y la existencia de carga variable dependiente del pH son otras dos de las características de suelos con propiedades ándicas, las cuales se están estrechamente relacionadas con la presencia de compuestos de bajo grado de orden. Concretamente, la existencia de estos constituyentes pueden controlar los procesos de sorción y desorción de fósforo, influyendo así en su biodisponibilidad para las plantas y afectando claramente a la productividad de estos suelos (Bache y Williams, 1971; Mozaffari y Sims, 1994; Negrin y col., 1996), ... Además, se ha observado que la elevada capacidad de retención de fosfatos junto con la elevada



susceptibilidad de estos suelos a ser erosionados puede contribuir a la eutrofización de aguas naturales (van der Zee y van Riemsdijk, 1986; Turner y Haygarth, 2000).

La carga variable es una característica fisicoquímica de los Andosoles relacionada principalmente con los contenidos de Fe y Al activos y con la fracción orgánica (Nanzzyo y col., 1993). La carga eléctrica de minerales como la caolinita y la alofana se encuentra localizada únicamente en los bordes de sus cristales y se debe a roturas y a la disociación de los protones de los grupos  $\text{OH}^-$ , coordinados con el Si y con Al estructural en posiciones de borde. En medio ácido, la protonación de los  $\text{OH}^-$  de los elementos en coordinación octaédrica hace que este tipo de minerales presenten carga positiva. Sin embargo, en condiciones básicas se produce la disociación de los  $\text{OH}^-$  de los grupos tetraédricos dando lugar a una carga neta negativa y baja. Se ha visto, que el desarrollo de carga negativa resultante de la abundancia de materia orgánica puede verse limitada a valores bajos de pH de suelo (pH 4), dado que los grupos carboxílicos de las materia orgánica forman complejos con hidróxidos de Al y Fe (Wada y Okamura, 1980) y pueden protonarse. La escasa presencia de carga permanente en minerales del tipo de la caolinita puede deberse a la existencia de impurezas (Norris y Pickering, 1983), dado que ésta es debida, principalmente, a sustituciones isomórficas de minerales de la arcilla de tipo 2:1. Conocer el comportamiento de la carga eléctrica en función del pH del suelo es una cuestión fundamental para un correcto manejo de los suelos de cultivo con carácter ándico, dado que permite conocer la capacidad que tienen los suelos para intercambiar/retener cationes o aniones (Gillman y Bakker, 1979; Batista-Gonzales y col., 1982; Zelazny y col., 1996; Summer y Miller, 1996; Baert y van Ranst, 1998).

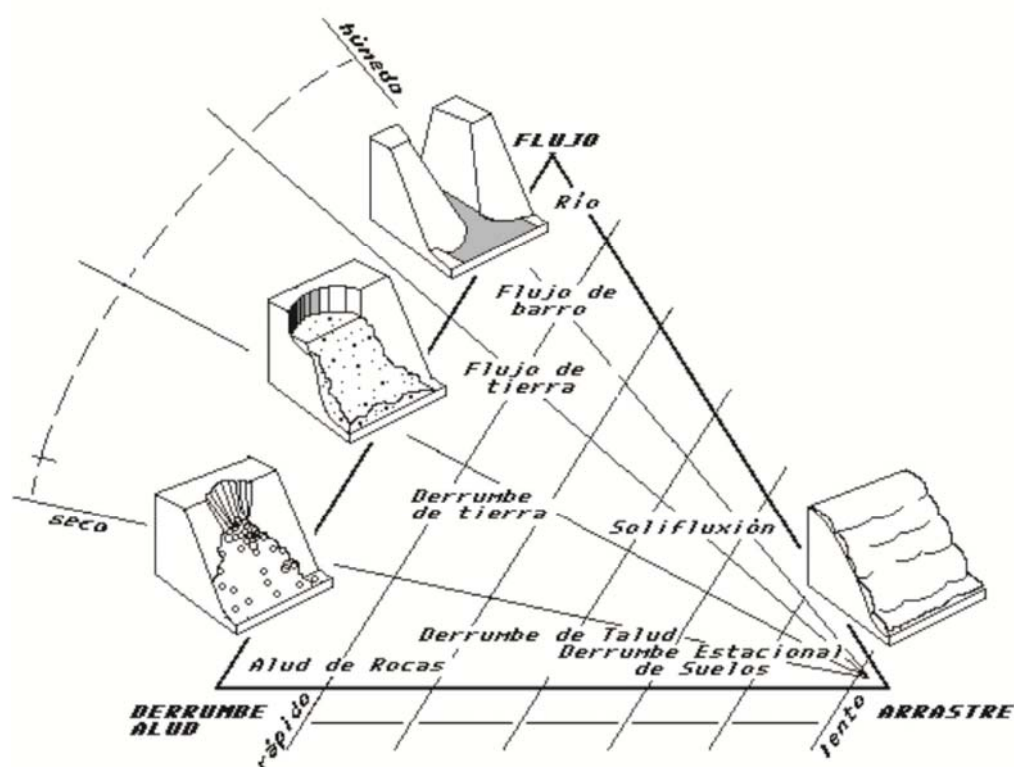


Figura 3.- Esquema general de las principales características de la erosión de laderas.

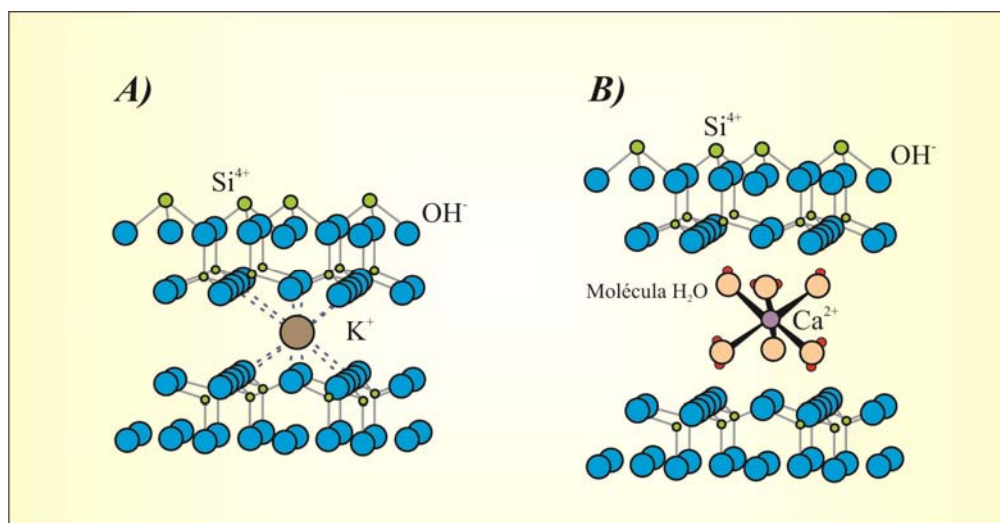


Figura 4.- Esquema general de los tipos de complejos de: A) Esfera interna; B) Esfera externa. (Sposito, 1989).

Se puede decir, por tanto, que la carga total de una partícula de suelo es la resultante de dos componentes: i) la carga permanente; y ii) la carga variable. La carga permanente está constituida por el complejo de esfera externa (Fig. 4 B) y por la capa difusa. Se origina por la sustitución isomórfica del Si de la capa tetraédrica de los aluminosilicatos por iones de tamaño similar, pero de valencia diferente (fundamentalmente por Al). La carga variable, sin embargo, está constituida por la carga protónica, la de la capa difusa y por la carga del complejo de esfera interna y externa (Fig. 4B). La carga protónica es la diferencia entre los moles de protones y los moles de hidroxilos, complejados por superficies activas orgánicas, como el humus, e inorgánicas, como los óxidos hidratados y los aluminosilicatos de tipo caolinita y alofana. Los protones de la capa difusa, así como la carga proveniente del complejo de esfera externa (Fig. 4 B), intervienen tanto en la carga variable como en la permanente. La carga del complejo de esfera externa (Fig. 4 B) y la del complejo de esfera interna (Fig. 4 A) se incrementan únicamente por los constituyentes de la solución del suelo que están adsorbidos en la superficie de las partículas. La carga permanente es generalmente negativa, mientras que las cargas del complejo de esfera interna (Fig. 4 A), complejo de esfera externa (Fig. 4 B) y protónica pueden ser positivas, nulas o negativas, dependiendo de la composición mineral y orgánica del suelo (Sposito, 1984; Barrow, 1987). Los suelos con predominio de aluminosilicatos laminares de tipo 2:1 (montmorillonita, vermiculita e illita) y de tipo 2:2 (clorita), se les identifica con la carga permanente. Los suelos con mezcla de minerales 2:1 y de hidróxidos de Al y Fe, tanto cristalinos como amorfos (alofana), se les denomina de carga variable (Sánchez, 1976). En ellos, la carga protónica domina sobre la carga permanente y los cambios en el pH influyen fuertemente en el desarrollo de la carga superficial (Sposito, 1989). No obstante, es difícil considerar a las cargas variables y permanentes como entidades físicas separadas, puesto que tanto los minerales arcillosos como los óxidos hidratados de Fe y Al pueden exhibir ambos tipos de carga, una relacionada con los procesos de sustitución isomórfica en la red y otra asociada o producida por la influencia del medio en los enlaces Me-OH de bordes superficiales.

La capacidad de los suelos de intercambiar iones en la interfase sólido-líquido, tiene grandes repercusiones en el comportamiento del suelos, tanto desde el punto de vista de producción agrícola, dado que controla la disponibilidad de nutrientes para las planta ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ ), como edáfico, ya que interviene en los procesos de floculación-dispersión de arcillas, y por consiguiente en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados, y determina el papel del suelo como depurador natural, al permitir la retención de contaminantes.

### 3. Evolución Taxonómica de los Andosoles

Los sistemas de clasificación son una herramienta fundamental para el estudio y manejo de los suelos, sirviendo como esqueleto organizador y descriptor de las propiedades de los mismos. Mediante esta herramienta se favorece el intercambio de información entre la comunidad científica, lo que posibilita la comparación de resultados obtenidos en gran número de localidades. Desde los trabajos de Dokuchaev en 1903 (publicados en 1948), quién estableció por primera vez las bases de una clasificación de suelos con criterios científicos, y de su discípulo Sibirtzev (1860 – 1899), que formuló la teoría del origen climático de los suelos (*ley de zonalidad*), hasta la actualidad, los principales sistemas de clasificación de suelos utilizados por la mayor parte de la comunidad científica, Soil Taxonomy (ST) y World Reference Base (WRB) for Soil Resources, han sufrido numerosas modificaciones con el fin de agrupar con mayor precisión los distintos tipos de suelos. Según [Guy Smith \(1963\)](#) un sistema de clasificación debe de ser autodestructible para incorporar paulatinamente los nuevos conocimientos.

Durante la primera mitad del siglo XX los sistemas de clasificación existentes, como los de Marbut ([1927](#)) y Baldwin, Kellog y Thorp, ([1938](#)), Thorp y Smith ([1949](#)), Kubiena ([1952](#)), etc., prestaban gran atención a los procesos y factores de formación de suelos, lo que daba lugar a interpretaciones erróneas a la hora de describir cómo un suelo ha llegado a adquirir las propiedades y características que presenta, pues muchos de estos procesos no eran cuantificables ([Smith, 1983](#)) e incluso, en algunos casos, se contraponían unos a otros ([Simonson, 1959](#)). Todos estos sistemas de clasificación se incluyen dentro de las denominadas clasificaciones genéticas, que, en muchos aspectos, resultan muy especulativas y subjetivas.

A partir de la década de los 60, los nuevos sistemas de clasificación, la Soil Survey Staff ([1960](#)), precursora de la ST ([1975](#)), y la FAO-UNESCO ([1974](#)), antecesora de la actual WRB, comenzaron a utilizar la morfología, la composición y las propiedades del suelo como criterios para la diferenciación de los distintos tipos de suelos, dando lugar así a clasificaciones morfométricas. Con la utilización de propiedades cuantificables se elimina en gran medida la subjetividad de las clasificaciones genéticas, ya que se evita tener que realizar interpretaciones. Además, estas cuantificaciones ponen de manifiesto las ganancias, pérdidas, transferencias y transformaciones de los constituyentes del suelo, así como sus procesos relacionados ([Chadwick y col., 1990](#); [Brimhall y col., 1991](#); [Jersak y col., 1995](#)), lo que favorece, además, su comprensión ([Ugolini y Dahlgren, 1987](#)). Huguet del Villar (1937) fue el precursor de este enfoque, retomado en 1960 por Smith para la elaboración de la Soil Survey Staff. De todas formas, algunos sistemas de clasificación actuales, como el Australiano ([Isbell,](#)



1996), continúan empleando un enfoque genético como base para la diferenciación de los distintos tipos de suelos y, en todo caso, el grado de desarrollo del suelo y su evolución se incluyen al considerar la aparición de determinados horizontes de diagnóstico, lo que lleva a los sistemas actuales a un carácter morfogenético en el que la evolución o génesis del suelo se lee a través de la comprensión de la morfología composición y propiedades de cada horizonte y de las diferentes combinaciones en que éstos aparecen.

### **3.1. Evolución de los criterios de clasificación de Andisoles en la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, USDA).**

La presentación de la 7<sup>th</sup> *Approximation*, en el Congreso de la International Society of Soil Science, celebrado en Madison (EE.UU) en el año 1960, representó pasar de una concepción cualitativa o semicuantitativa a otra cuantitativa, abandonando definitivamente el esquema zonal propuesto anteriormente por Sibirtzev.

En la 7<sup>th</sup> *Approximation*, los suelos actualmente clasificados como Andosoles se incluían dentro del Orden de los *Inceptisols*, suelos de muy diversa condición, catalogados, generalmente, como suelos incipientes o jóvenes, con presencia de horizontes de diagnóstico, que se forman rápidamente, pero en los que no se dan fenómenos de iluviación y eluviación significativos y en los que no se da una meteorización extrema. Se incluían suelos que anteriormente habían sido denominados como **Brown Forest soils, Subarctic Brown Forest soils, Tundra, Ando soils, Sols Bruns Acides, Lithosols y Regosols**, así como un número más o menos amplio de suelos con propiedades gleicas denominados como *Humic Gley* y *Low-Humic Gley soils*.

Dentro del Orden Inceptisols se diferenciaban cuatro Subórdenes en función del nivel de saturación de agua (*Aquepts*), del contenido en alofana (*Andepts*), de la presencia de un epipedon úmbrico (*Umbrepts*) y del espesor (*Ochrepts*). Los suelos incluidos en el suborden Andepts se definían como aquellos que tienen un elevado contenido de ceniza volcánica (> 60 %), alofana (> 60 %) o ambos, pudiendo tener un epipedon ócrico, móllico o úmbrico, lo que daba lugar a la diferenciación de los distintos tipos de suelos dentro del Suborden.

A la vista de lo mencionado, podemos concluir que los criterios de clasificación, para incluir un suelo dentro del Suborden Andepts, utilizados en la 7<sup>th</sup> *Approximation* (1960) son demasiado genéricos e inexactos, cuestión totalmente reconocida en el propio sistema de clasificación, debido, en gran parte, a la falta de técnicas analíticas precisas y adecuadas para este fin.

La necesidad de establecer categorías más precisas que permitiesen hacer interpretaciones más cuantitativas y fiables de los suelos condujeron a la publicación en 1975 de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). El desarrollo de nuevas técnicas analíticas, junto con una mayor experiencia en el estudio de los suelos, ha hecho posible la mejora del anterior sistema de clasificación, la 7<sup>th</sup> *Approximation*. En la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) los suelos Ándicos se incluían igualmente dentro del Suborden de los Andepts, pero su definición se vio modificada con la introducción de nuevos requerimientos:

1. Con una profundidad de 35 cm o más, o con una profundidad de menor de 35 cm si existe un contacto lítico o paralítico, presenta: i) una densidad aparente en la fracción de tierra fina de  $<0,85 \text{ g cm}^{-3}$  y un complejo de cambio dominado por material amorfo; o ii) el 60 % o más (en peso) es vidrio volcánico, ceniza u otro material piroclástico de carácter vítrico.
2. No presenta un régimen de humedad ácuico o no presenta las características de humedad asociadas a los *Aquepts*.

Al igual que en el caso de la 7<sup>th</sup> *Approximation*, en la Soil Survey Staff (1975) los criterios para la inclusión de un suelo dentro de este Suborden eran demasiado amplios, por lo que se incorporaron dentro de este Suborden suelos desarrollados sobre materiales de muy diversa composición química y mineralógica, mezclando así suelos de carácter ándico con otros de naturaleza podzólica (Loveland y Bullock, 1975).

La reclasificación del Suborden Andepts fue propuesta por Smith en 1978. Según este autor, la Soil Taxonomy (1975) tenía una serie de defectos (uso de saturación en bases en suelos de carga variable, inadecuada atención a las propiedades de retención de agua, uso del color para la definición de subgrupos, etc.) que conducían a errores en la interpretación y por tanto de clasificación. La propuesta de Smith (1978), sustentada, generalmente a nivel de Suborden, en una separación en base a humedad del suelo y regímenes de temperatura de las diferentes zonas climáticas, continuaba presentando problemas de interpretación, principalmente a nivel de familia. Incluía dentro de este grupo los suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, pumitas y otros materiales piroclásticos con un complejo de cambio dominado por compuestos amorfos de Al, Si y humus y cuya matriz presentase como elemento principal vidrio volcánico.

En la siguiente propuesta, presentada por Arnold (1988) en los años ochenta, se incluían, además, las propiedades físicas, químicas y mineralógicas como criterios esenciales en la clasificación, diferenciando así tres tipos de suelos:

- i) Suelos con *propiedades vítricas*: aquellos desarrollados sobre materiales volcánicos dominados por vidrios volcánicos o sobre basaltos jóvenes. Dentro de este grupo se incluían los Vitrandepts, Criandepts de la ST y “suelos de pumita” de Nueva Zelanda, Japón y Oregón. El requerimiento básico para la inclusión de un suelo dentro de este grupo era tener un 0,4% o más de Al extraído en oxalato ácido, equivalente a un 2 % de alofana, lo que excluía a los Entisoles desarrollados sobre materiales volcánicos ubicados en la parte superior de los volcanes.
- ii) Suelos con *propiedades ándicas*: aquellos que presentaban una densidad aparente menor de  $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ , un complejo de cambio dominado por material amorfo, una retención de fosfatos superior al 85 % y un 2 % o más de Al extraído en oxalato ácido, equivalente a u 8 % de alofana (Parfitt y Childs, 1988).
- iii) Suelos con *propiedades intermedias*: aquellos que presentan propiedades entre los suelos con propiedades vítricas y los suelos con propiedades ándicas, los denominados *black hole*. Se corresponden con suelos de textura gruesa con un contenido de vidrio volcánico entre el 5-30 % y con un contenido en alofana entre el 2-8 %.

Desde la publicación original de la ST en 1975, se han sucedido versiones abreviadas de la misma, desde 1983, con una cadencia temporal de aproximadamente 2 años, en las que, paulatinamente se han incluido las modificaciones recomendadas por los *International Soil Classification Committees* (ICOMs), en cuya 4ª edición se añadió el Orden Andisols. En las siguientes ediciones de las ST (Soil Survey Staff, 1983, 1985, 1987), los criterios para incluir un suelo dentro del Suborden Andepts permanecieron constantes. De igual forma, a niveles inferiores de jerarquía, a nivel de Gran Grupo, los criterios para la diferenciación de los diferentes tipos de suelo no sufrieron cambio alguno hasta la publicación de la edición de la Soil Survey Staff de 1990, presentando en todos los casos siete Gran Grupos: *Cryandepts*, *Durandepts*, *Hydrandepts*, *Placandepts*, *Vitrandepts*, *Eutrandepts*, *Dystrandepts*.

El Orden Andisol descrito en la edición de la ST correspondiente al año 1990 (Soil Survey Staff, 1990) presenta 7 nuevos Subórdenes, cuatro más que los inicialmente establecidos por Arnold (1988). Estos quedan claramente diferenciados teniendo en cuenta el régimen climático y de humedad de la zona en la que se encuentran:

- i) *Aquands*: aquellos que tienen un epipedon hístico ó que dentro de los 50 cm superiores, en caso de horizonte mineral, o sobre el límite de un horizonte orgánico con propiedades ándicas, aún siendo menos profundo, presente un dos por ciento o más de segregaciones redox ó un croma de 2 ó menos, ó suficiente hierro ferroso para dar reacción a a,a'-dipyridyl en algún periodo del año en el que no está siendo irrigado.
- ii) *Cryands*: aquellos que presentan un régimen de temperatura criico o pergéllico.
- iii) *Torrands*: aquellos que presentan un régimen de temperaturas arídico.
- iv) *Xerands*: aquellos que presentan un régimen de humedad de carácter xérico.
- v) *Vitrands*: suelos con textura gruesa con una capacidad de retención de agua menor del 15 % (a 1500 kPa) cuando se encuentran secos al aire ó del 30 % si se encuentran húmedos, en al menos 35 cm dentro de los 60 cm superficiales del pedon.
- vi) *Ustands*: aquellos que presentan un régimen de humedad de carácter Ústico.
- vii) *Udands*: aquellos que presentan un régimen de humedad de carácter Údico.

A nivel de subgrupo, en la ST de 1990 hay algunas modificaciones en relación con los previamente definidos por Smith (1978), como por ejemplo el subgrupo de los *Acraquoxic* y *Acrudoxic*, anteriormente en un único subgrupo (Smith, 1978) denominado *Acric*, que han sido renombrados así para *Aquands* y *Udands*, respectivamente, con la finalidad de indicar que son una etapa intermedia entre los *Acraquox* y *Acrudox* correspondientes al Orden Oxisols; ó el subgrupo *Borands*, que incluía suelos bajo un régimen de temperatura frigid o cryic y que fue reemplazado por *Cryands* (Leamy y col., 1990).

A lo largo de los años 90 no se realizaron grandes modificaciones (Soil Survey Staff, 1992, 1994, 1996 y 1998) en cuanto al número y características principales de cada uno de los Órdenes establecidos con anterioridad en la ST de 1990, aunque si se fueron incluyendo algunas correcciones puntuales especialmente indicadas por el International Committee of Andisols y ICOMs. En el año 2003 se publica la 9ª edición de la ST

y en ella se establece el nuevo suborden *Gelands*, que divide el anterior suborden *Cryands* en dos, para diferenciar suelos con temperatura media anual de 0 °C o inferior y una temperatura en verano de 8 °C o inferior, en caso de no ser horizontes O, ó de 5 °C o inferior, en caso de ser horizonte O.

### 3.2. Evolución de los criterios de clasificación de Andosoles en la World Reference Base (FAO)

Una aproximación similar a la realizada por la ST fue empleada por la FAO-UNESCO (1974), en su leyenda del Mapa Mundial de Suelos 1: 5.000.000, y más recientemente por la WRB (1988) para la clasificación de suelos. Ambos sistemas de clasificación fueron ampliamente utilizados por científicos de todo el mundo como herramienta para la clasificación de suelos, aún teniendo menor detalle que la ST. A la par que la ST y a medida que se fueron desarrollando nuevas técnicas analíticas, los sistemas de clasificación de la FAO se han ido mejorando y completando a lo largo del tiempo.

En contraposición a la ST, la primera Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (1974) ya incluía a los Andosoles como un tipo de suelos bien diferenciado. En esta primera aproximación, los Andosoles simplemente se definen como “suelos ricos en vidrio volcánico con un horizonte superficial de color oscuro, para cuya clasificación se requería la presencia de un horizonte A úmbrico o móllico sobre un horizonte B, o un horizonte A ócrico sobre uno B cámbico y sin presencia de cualquier otro horizonte diagnóstico, y que en al menos 35 cm presentase alguna de las siguientes propiedades: i) una densidad aparente en la fracción tierra fina menor de 0,85 g cm<sup>-3</sup> y complejo de cambio dominado por material amorfo; ii) 60 % o más de cenizas volcánicas vítreas, escorias u otros materiales vítreos piroclásticos en las fracciones limosa, arcillosa y gravosa; iii) carecer de propiedades hidromórficas en los 50 cm superficiales; carecer de características diagnóstico para Vertisoles y carecer de un horizonte altamente salino”. Además se hizo una diferenciación clara de cuatro tipos de Andosoles en función de los horizontes diagnóstico presentes junto a determinadas características del suelo:

- 1) *Andosoles ócricos*: Andosoles con un horizonte A ócrico y un horizonte B cámbico, con consistencia untuosa y/o textura franco-limosa o más fina, según el promedio ponderado para todos los horizontes comprendidos entre los 100 cm superiores.
- 2) *Andosoles móllicos*: Andosoles con un horizonte A móllico, con consistencia untuosa o textura franco-limosa o más fina, según el promedio ponderado para todos los horizontes hasta los 100 cm superiores.
- 3) *Andosoles húmicos*: Andosoles con un horizonte A úmbrico, con una consistencia untuosa o textura franco-limosa o más fina, según el promedio ponderado para todos los horizontes hasta los 100 cm superiores.
- 4) *Andosoles vítricos*: Andosoles que carecen de consistencia untuosa y/o tienen una textura más gruesa que franco-limosa, según el promedio ponderado para todos los horizontes hasta los 100 cm superiores.

Posteriormente, en la versión revisada de la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (1988) se introdujeron algunas modificaciones, aunque el concepto y definición de los Andosoles ha permanecido

constante. En esta edición se aplica por primera vez el término de *propiedades ándicas* para definir los materiales edáficos que cumplían uno o más de los siguientes requisitos:

- a) *El Al más la mitad del Fe extraíbles con oxalato ácido es el 2 % como mínimo de la fracción tierra fina; y la densidad aparente de la tierra fina medida a la humedad de campo es  $0,9 \text{ Mg m}^{-3}$  o menos; y la retención de fosfatos es mayor del 85 %.*
- b) *Más del 60 % en volumen de todo el suelo es material clástico volcánico de un tamaño superior a 2 mm; y el Al más la mitad del Fe extraíbles con oxalato ácido es de 0,40 % como mínimo de la fracción tierra fina.*
- c) *La fracción de 0,02 a 2,0 mm es al menos el 30 % de la fracción tierra fina y cumple una de las siguientes características: i) si la fracción tierra fina tiene un contenido de Al más la mitad del Fe extraíbles con oxalato ácido de 0,4 % o menos, debe haber al menos un 30 % de vidrios volcánicos en la fracción de 0,02 a 2,0 mm; o ii) si la fracción de tierra fina tiene un contenido de Al más la mitad del Fe extraíbles con oxalato ácido del 2 % o más debe haber al menos el 5 % de vidrios volcánicos en la fracción de 0,02 a 2,0 mm; o iii) si la fracción de tierra fina tiene un contenido de Al más la mitad del Fe extraíbles con oxalato ácido entre el 0,4 y 2 % debe haber al menos entre el 30 y el 5 % de vidrios volcánicos en la fracción de 0,02 a 2,0 mm.*

También existen diferencias en cuanto al número de tipos de Andosoles incluidos en esta versión en contraposición a la versión anterior de 1974. En este caso se establece una división muy similar a la anterior aunque aquí se adicionaron las propiedades gleicas y la existencia de permafrost, lo que condujo a la generación de dos nuevos tipos de Andosoles que se añadieron a los cuatro anteriormente descritos:

- *Andosoles gléicos:* Andosoles que presentan propiedades gleicas dentro de una profundidad de 100 cm a partir de la superficie y que carecen de permafrost en una profundidad de 200 cm a partir de la superficie.
- *Andosoles gélidos:* Andosoles con permafrost dentro de una profundidad de 200 cm a partir de la superficie.

Tal y como se puede observar, en ninguna de las dos ediciones de la Leyenda del Mapa Mundial de suelos se incluyen como suelos ándicos todos aquellos que, aun cumpliendo las características descritas, estuviesen desarrollados a partir de materiales de partida no volcánicos.

Con la creación de la WRB, iniciativa de la FAO apoyada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelos (ISSS) que data de 1980 y cuyo primer borrador fue presentado en el 15º Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo que tuvo lugar en Acapulco, México, en el año 1994, muchos de los problemas presentados en la clasificación de los Andosoles y otros tipos de suelos fueron solucionados, incorporando para ello los últimos conocimientos relacionados con el recurso suelos global y sus interrelaciones.

Entre los nuevos cambios incluidos en la WRB (1998) cabe citar la inclusión de *Litosoles*, *Rendzinas* y *Rankers* en un único grupo, *Leptosoles*, la división de los *Luvisoles* en *Luvisoles* y *Lixisoles*, la introducción de *Antrosoles*, *Plintsoles*, *Calcisoles* y *Gipsisoles*, así como la adaptación de algunos de los criterios de clasificación y la redefinición de algunos otros como el correspondiente a las propiedades ándicas. En la WRB (1998) se define un **horizonte ándico** como *aquel que resulta de la meteorización moderada de depósitos piroclásticos u otros materiales volcánicos, como loess, argilitas y productos de meteorización ferralítica, cuya mineralogía esté dominada por minerales de bajo grado de orden*. Según Shoji y col. (1996) y Berding (1997) un horizonte ándico debe de tener las siguientes propiedades físicas, químicas y mineralógicas:

- i) Densidad aparente del suelo a capacidad de campo (sin secado previo) menor de  $0,9 \text{ kg dm}^{-3}$ ; y
- ii) 10 por ciento o más de arcilla y un valor de  $Al_{(oxalato)} + 1/2Fe_{(oxalato)}$  en la fracción tierra fina de 2 por ciento o más; y
- iii) Retención de fósforo de 70 por ciento o más; y
- iv) Contenido en vidrio volcánico en la fracción tierra fina menor de 10 por ciento; y
- v) Espesor de por lo menos 30 cm.

En función de las cantidades de  $Si_{(oxalato)}$  y  $Al_{(oxalato \text{ y pirofosfato})}$  se estableció una separación de los horizontes ándicos en dos grupos:

- **Sil-ándicos:** aquellos que tienen un 0,6 % o más de  $Si_{(oxalato)}$  o una relación  $Al_{(pirofosfato)}/Al_{(oxalato)}$  menor de 0,5.
- **Alu-ándicos:** aquellos que por el contrario presentan menos del 0,6 % de  $Si_{(oxalato)}$  o una relación  $Al_{(pirofosfato)}/Al_{(oxalato)}$  de 0,5 o más.

Atendiendo a las propiedades descritas, un Andosol puede ser definido como *un suelo que contiene o bien un horizonte vítrico, caracterizado por la presencia de vidrio volcánico y otros minerales primarios en la fracción de tierra fina, o un horizonte ándico que comienza dentro de los 25 cm desde la superficie del suelo, sin que exista otros horizontes de diagnóstico (a menos que estén enterrados a más de 50 cm) que no sean un horizonte hístico, fúlvico, melánico, móllico, úmblico, ócrico, dúrico o cámbico*.

Una de las diferencias claras entre la WRB y su predecesora, la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos, es la utilización de horizontes diagnóstico para llevar a cabo la clasificación de los suelos. En relación con la clasificación específica de Andosoles, la WRB añade un nuevo criterio, la retención de fosfatos, y unifica los contenidos en  $Al_{(oxalato)} + 1/2Fe_{(oxalato)}$  para el total de la tierra fina, aunque nuevamente excluye los suelos desarrollados sobre materiales de partida no volcánicos.

En el año 2006 se publica la segunda edición de la WRB y en el año 2007 la primera actualización, donde se recogen una serie de modificaciones, con respecto a la versión anterior de 1998, dirigidas

principalmente hacia una mayor unificación de los sistemas de clasificación existentes en la actualidad. En la última actualización, cuyo principio básico para la diferenciación de las clases de suelos es la determinación de los procesos de formación de suelos, primarios y secundarios, en función de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas, se amplía el número de Grupos de Referencia de 30 a 32 y, además, se hace un ajuste de los ya existentes, así como de las propiedades requeridas para la inclusión de un suelo dentro de un determinado grupo.

Estos reajustes en las definiciones también afectaron al grupo de los Andosols, tanto a nivel de propiedades diagnóstico como a nivel de definición de grupo. A nivel de definición de propiedades ándicas, los cambios introducidos afectaron: i) *al tanto por cien de retención de fosfatos, pasando del 70 al 85 por cien*; ii) *se eliminó el criterio de espesor, que en la WRB de 1998 estaba establecido en 30 cm o más*; iii) *se eliminó el contenido en vidrio volcánico como criterio imprescindible*; y iii) *se introdujo el carbono orgánico como nuevo criterio para establecer propiedades ándicas. Los criterios para la separación de Sil-ándicos de Alu-ándicos no sufrieron cambio alguno*.

Con los cambios en los criterios para propiedades ándicas se produjo una variación de los criterios para clasificar un suelo como Andosol, que pasaron a ser los siguientes:

1. *Suelos que contienen uno o más horizontes con propiedades ándicas o vítricas con un espesor combinado de: i) 30 cm o más dentro de los 100 cm superficiales y comenzando dentro de los 25 cm superficiales; o ii) 60 % o más del espesor total del suelo, cuando hay roca continua o un horizonte cementado o endurecido entre los 25 y 50 cm a partir de la superficie; y*
2. *No existe un horizonte árgico, ferrálico, petroplántico, plántico o espódico ( a menos que estén enterrados a más de 50 cm).*

La eliminación del contenido en vidrio volcánico, como criterio imprescindible, para establecer propiedades ándicas en un suelo ha posibilitado la inclusión como Andosols todos aquellos suelos, que cumpliendo los criterios para propiedades ándicas, se encuentren desarrollados sobre materiales de partida no volcánicos, cuestión que hasta el momento era inviable.

## 4. Los Suelos Ándicos en España

Inicialmente, el estudio de los Andosols y suelos con propiedades ándicas en España se encuentra ligado a la presencia de materiales de origen volcánico relativamente recientes (así como de rocas básicas y ultrabásicas, no volcánicas, fácilmente alterables como gabros, anfíbolitas, granulitas, etc.), que funcionan como material de partida de suelos incipientes con elevada intensidad y velocidad de meteorización, por lo que los esfuerzos iniciales tuvieron una mayor incidencia en las Islas Canarias y, posteriormente, en otras formaciones volcánicas Cenozoicas como las de Cabo de Gata, islas de Alborán, región de Olot, etc.



#### 4.1. Regiones volcánicas de la Península Ibérica

En la Península Ibérica se aprecian solamente cinco zonas de origen volcánico (Fig.6), originadas por diferentes procesos magmáticos, lo que conduce a una diferencia sustancial del tipo de rocas que tienen asociadas:

1. El área volcánica más septentrional de la Península Ibérica se encuentra ubicada en la **Cuenca Vasco-Cantábrica** (1, Fig.6). Presenta un magmatismo esencialmente alcalino y de origen mantélico, desarrollado entre el periodo Albiense Superior y la Era Santoniense, que dio lugar a formaciones de composición basáltica y traquítica, localizadas, generalmente, entre las rocas sedimentarias de origen marino que forman el Sinclinorio de Vizcaya (Fig.5). Una de las estructuras estratigráficas más destacables dentro del Sinclinodio de Vizcaya son las denominadas lavas almohadilladas (pillow lavas), formadas por acumulación de tubos de lava en ambientes subacuosos con bajas tasas de emisión (Moore, 1965; Cann, 1970; Wells y col., 1979; Robson y Cann, 1982; Juteau, 1993; Chadwich y Embley, 1994; Kennish y Lutz, 1998). Otro tipo de material volcánico presente en la Cuenca Vasco-Cantábrica son las ofitas del Triásico, localizadas en la comarca de Lea-Artibai (Vizcaya), que dan lugar a suelos de textura franca y con propiedades ándicas (Olarieta y col., 2007).

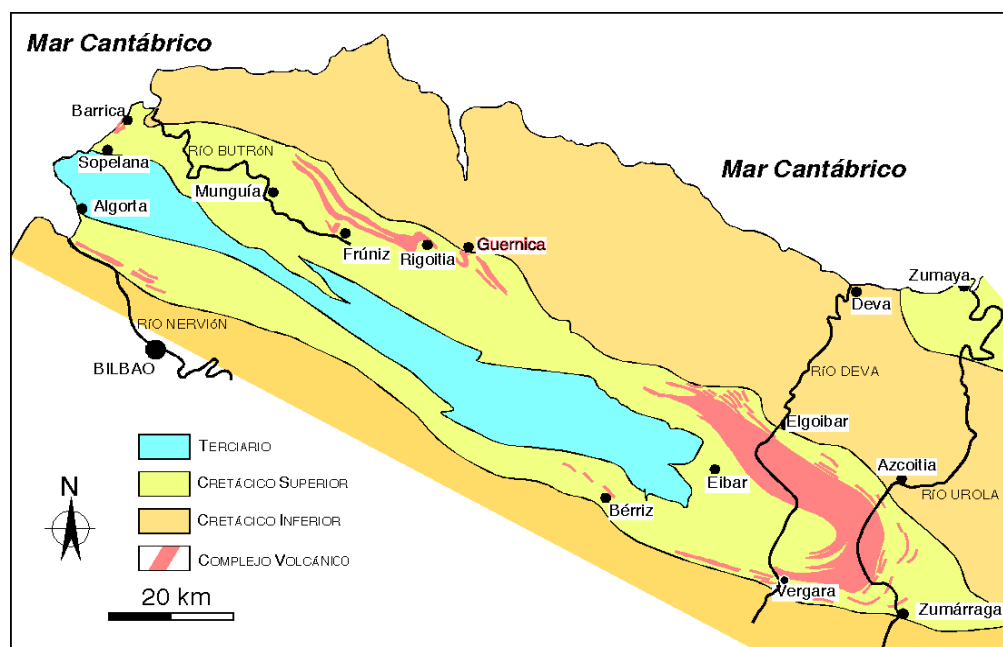


Fig. 5.- Mapa geológico simplificado del sinclinorio de Vizcaya en el que se representa la distribución de los afloramientos volcánicos (Cretácico) de la Cuenca Vasco-Cantábrica (modificado de Rossy, 1988).



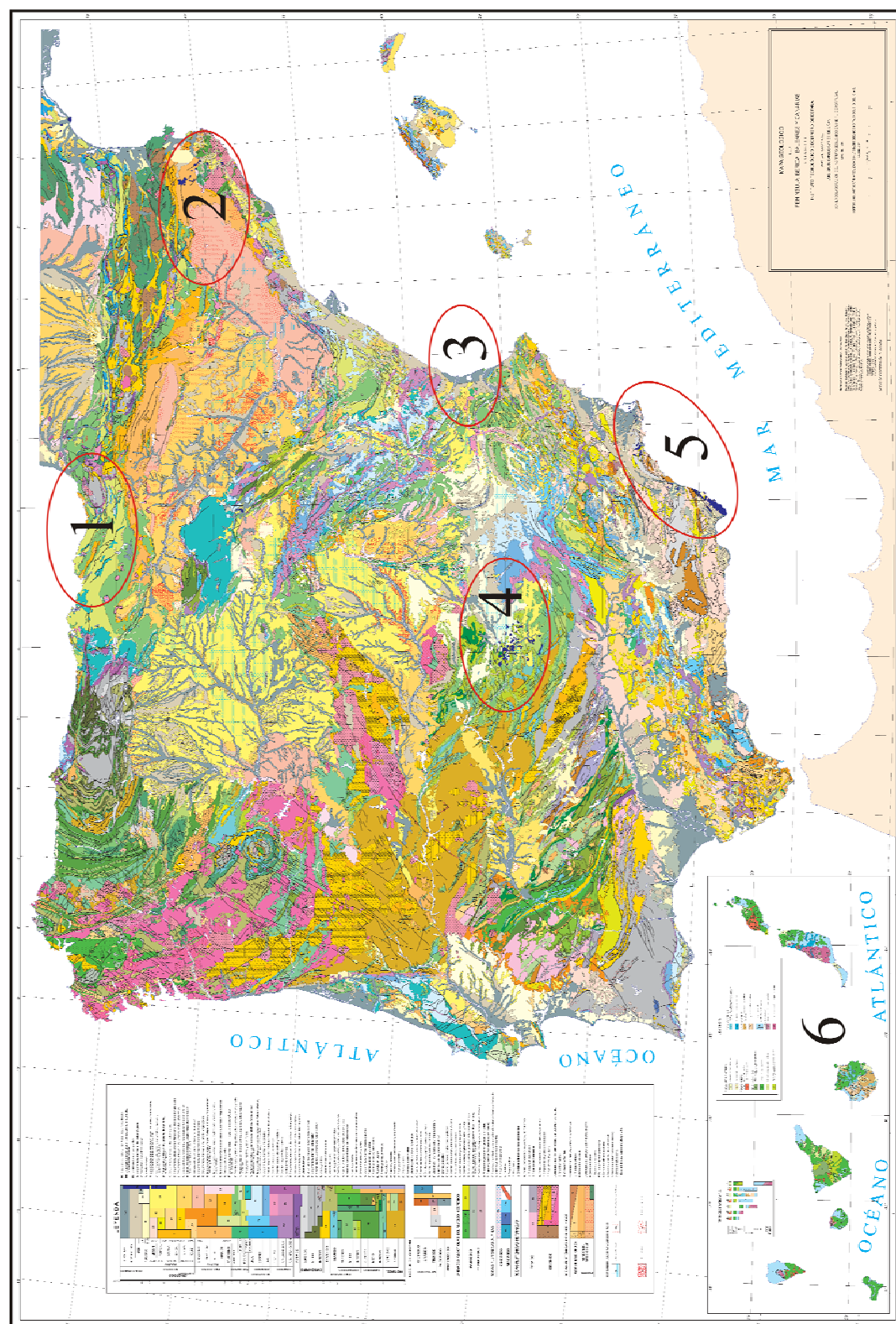


Fig. 5.- Mapa Geológico de la Península Ibérica, Islas Baleares y Canarias. Los números se corresponden con las zonas de origen volcánico: 1) Cuenca Vasco-Cantábrica; 2) región volcánica de Cataluña; 3) región volcánica de Levante; 4) Campo de Calatrava (Ciudad Real); 5) región volcánica de Almería-Murcia; 6) Islas Canarias. (Instituto Geológico y Minero de España, 1994).

2. Al noreste peninsular, la región volcánica de **Olot**, ubicada en la Comunidad Autónoma de Cataluña (2, Fig.6), se corresponde con una manifestación magmática de tipo intraplaca, consecuencia de la tectónica extensional de tipo *rift* que afecta a todo el Mediterráneo occidental desde el Mioceno (Martín y col., 1992; Wilson y Downes, 1991 y 1992). Los episodios más antiguos de este vulcanismo neógeno-cuaternario se observan en el Alt Empordà y tienen una edad comprendida entre los 10 y los 11 millones de años. Desde entonces y hasta la actualidad, la actividad volcánica ha aparecido de manera esporádica pero relativamente continuada, pasando al Baix Empordà, posteriormente a La Selva y finalmente a la Garrotxa, donde el vulcanismo ha estado presente desde los 350.000 hasta hace unos 10.000 años, siendo la manifestación más reciente el volcán del Crosat. Este vulcanismo está representado casi exclusivamente por rocas basálticas (basaltos y basanitas) derivados de magmas alcalinos poco evolucionados (Araña y col., 1983; López-Ruiz y Rodríguez Badiola, 1980; López-Ruiz y col., 1986; López-Ruiz y Cebriá, 1987; Cebriá y col., 2000).

3. La región volcánica de **Levante** (3, Fig.6) está constituida por dos afloramientos ubicados en la provincia de Valencia, Confrentes y Picassent, y por numerosos afloramientos marinos de los que sólo emergen los correspondientes a las Islas Columbretes. El área de Confrentes presenta un vulcanismo de carácter monogénico y estromboliano (Lendínez y Terra, 1980), con edades comprendidas entre los 2,6 y 1 millones de años, caracterizado por la presencia de limburgitas o nefelinitas alovínicas y frecuentes enclaves peridotíticos (Ancochea y col., 1984) de dunitas, harzburgitas y lherzolitas con espinela. Por otra parte, la zona del Picassent se corresponde con coladas basálticas de unos 8 millones de años (Ancochea y Huertas, 2003) más evolucionadas que en el caso anterior (Ancochea y col., 1984; Ancochea y Huertas, 2002). Finalmente, la Islas Columbretes representan la última fase de actividad volcánica y presentan edades comprendidas entre los 0,33 y 1 millones de años (Aparicio y col., 1991). Están formadas con material basáltico (basanitas) y tobas de composición fenolítica o traquítica (Vidal y Fuster, 1974; Aparicio y García, 1995).

4. En la provincia de Ciudad Real se encuentra la región volcánica de **Campo de Calatrava** (4, Fig.6). Manifiesta una fase volcánica de carácter ultrapotásico, constituida por leucitas olivínicas y con una edad poco definida situada entre los 8,7 y los 6,4 millones de años, y otra de carácter alcalino y ultraalcalino, constituidos por melilitas olivínicas, nefelinitas olivínicas, basanitas, basaltos alcalinos y frecuentes enclaves peridotíticos (Ancochea, 1983; Ancochea y Nixon, 1987), activa desde los 3,7 hasta hace menos de 0,7 millones de años (Ancochea y col., 1979; Ancochea, 1982; Bonadonna y Villa, 1984; Gallardo, 2002).

5. En la región volcánica de **Almería-Murcia** (5, Fig.6) la actividad volcánica se desarrolló en dos periodos: i) el primero se inicia entre el Langiense y el Burdigaliense (Zeck y col., 2000; Scotney y col., 2000), con la generación de lavas calco-alcalinas, y finaliza en el Messiniense, con la formación de rocas ultrapotásicas; ii) el segundo, se lleva a cabo 4 millones de años después, en el que se generó un magmatismo basáltico alcalino. La gran variedad de magmas dio lugar una gran heterogeneidad composicional. De esta forma, los magmas calco-alcalinos se caracterizan por la presencia de andesitas basálticas, andesitas y riolitas, mientras que los magmas basálticos alcalinos solamente presentan en su constitución basanitas y basaltos olivínicos.

A)



B)



Fig. 7.- Perfiles de suelo desarrollados sobre distintos tipos de material de origen volcánico: A) pillow lava; B) traquitas. Monte Karakate, Vizcaya

Tal y como hemos visto, existe una amplia bibliografía que engloba multitud de investigaciones sobre las estructuras volcánicas y magmatismo en sentido estricto. Sin embargo, los estudios sobre la caracterización y tipología de los suelos son realmente escasos. Entre los existentes cabe destacar los realizados por Rodríguez y Monturiol (1973) y Bech y col. (1974, 1976 a y b, 1977) en la zona volcánica de Olot y los de Delgado y col. (1972) y Gisbert (1987) sobre las Islas Columbretes.

Recientemente, con motivo de la “XXVI Reunión Nacional de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo”, celebrada en Durango (Vizcaya) en 2007, se han caracterizado, química y mineralógicamente, una serie de suelos ubicados en el Monte Karakate (Guipúzcoa) y desarrollados sobre distintos materiales de partida de origen volcánico. Así, en la zona baja de la ladera dominan las lavas almohadilladas (*pillow lava*) (Fig.7.A), mientras que en la zona alta dominan los basaltos, las traquitas y las brechas con mezcla de distintos materiales (Fig.7.B). A nivel de clasificación de suelos, las principales diferencias se atribuyen a la distinta posición fisiográfica en el macizo. Así, en la zona baja de la ladera encontramos suelos clasificados como *Typic Eutrudept* (Soil Survey Staff, 2006) o *Leptic Cambisol* (WRB, 2006); a media ladera *Pachic Melanudand* (SSS, 2006) o *Aluandic Andosol* (WRB, 2006); y en la cima *Humic Lityhic Dystrudept* (SSS, 2006) o *Umbric Leptosol* (WRB, 2006).



Los suelos desarrollados sobre materiales básicos, como es el caso de las pillow lava, ubicados en la parte baja de la ladera no desarrollan suelos con propiedades ándicas, aún cuando las condiciones de humedad y temperatura son las idóneas para su desarrollo. Esto se debe, principalmente, a la llegada de gran cantidad de bases, especialmente de  $Mg^{2+}$ , procedentes de las posiciones altas de la ladera, tamponando el sistema a valores de pH cercanos a 6, lo que dificulta la solubilización del  $Al^{3+}$  y, por ende, la formación de componentes amorfos. A medida que se va hacia cotas más elevadas, tanto los suelos desarrollados sobre materiales volcánicos básicos (p.e. basalto) como sobre materiales volcánicos ácidos (p.e. traquitas) sufren un mayor lavado, con lo que las condiciones favorecen una rápida alteración de estos materiales, y el desarrollo de propiedades ándicas.

En el último escalón, la cima del macizo, las condiciones de lavado son incluso mayores, con lo que se llegan a dar procesos podzolizantes en superficie, detectándose una importante presencia de ácidos orgánicos libres.

#### *4.2. Región volcánica de las Islas Canarias*

No guardan ninguna relación geológica directa con la Península Ibérica y su evolución. Son un conjunto de islas con características geológicas propias, de origen volcánico, enraizadas en el fondo oceánico, cuya evolución geodinámica está ligada a la apertura y extensión del océano Atlántico, desde el Cretácico inferior a la actualidad. Son similares en su génesis a las islas Madeira y a las de Cabo Verde.

La actividad volcánica del archipiélago se inicia en la dorsal oriental canaria en el Oligoceno, con la formación del Complejo Basal de la isla de Fuerteventura. En contraste, el periodo de actividad volcánica más reciente data del Pleistoceno Inferior, momento en el que se formaron las islas de La Palma y el Hierro, siendo el Mioceno Medio el periodo de mayor emisión de productos volcánicos ([Ancochea y col., 2004](#)), si bien continua existiendo en la actualidad una cierta actividad volcánica, como en los últimos volcanes históricos de la isla de La Palma.

La gran variedad de procesos volcánicos que han tenido lugar en todo el archipiélago han conducido a la existencia de una gran variedad de rocas muy diferentes en composición ([Fuster, 1975](#); [Schmincke, 1982](#)). La característica principal de las rocas del archipiélago canario es su carácter fuertemente alcalino, entre las que destacan los basaltos alcalinos y basanitas, como rocas menos evolucionadas, traquiblastos, traquiandesitas, tefritas y tefritas filoníticas, como rocas intermedias, y fonolitas, traquitas y riolitas, como las más evolucionadas.

Al contrario de lo sucedido en los materiales de origen volcánico de la Península Ibérica, en las Islas Canarias existen multitud de publicaciones relacionadas con la caracterización de los suelos con propiedades ándicas, así como acerca de los problemas ambientales (erosión, calidad de las aguas, etc.) derivados de las características específicas de este tipo de suelos.

Los primeros trabajos realizados sobre la caracterización química, física y mineralógica fueron elaborados a lo largo de la década de los 70 y principios de los años 80, en muchos de los cuales se hace, además, un análisis profundo sobre la influencia que determinados factores - el clima, la edad del material de partida, la posición topográfica, etc. - tienen sobre el desarrollo de los suelos del archipiélago canario (Fernández Caldas y Guerra Delgado, 1971; Fernández Caldas y Tejedor Salguero, 1975; Quantin y col., 1975, 1976 y 1977; Rodríguez Rodríguez, 1977; Fernández Caldas y Rodríguez Hernández, 1978; Quantin y col., 1978 a y b; Tejedor Salguero y col., 1978 a y b, 1979 y 1980; Fernández Caldas y col., 1979; Rodríguez Hernández y col., 1979; Fernández Caldas y col., 1981; ...).

La gran variedad de microclimas presentes en la zona, determinados en gran medida por la orientación del archipiélago, en un arco en dirección W-E que genera un déficit de humedad en las laderas orientadas al Sur y mayor cuanto más al Este, conduce a una gran variedad de tipos de suelos (Fernández Caldas y col., 1982 y 1987). La excesiva aridez junto con la susceptibilidad de los suelos ándicos a ser erosionados, son los factores que contribuyen, en mayor medida, al creciente proceso de desertificación en algunas zonas de las Islas Canarias (Rodríguez y col., 1993 a, b, 1998; Rodríguez Rodríguez, 2002). Una de las causas principales de la pérdida de cobertura edáfica es la retirada del manto vegetal que actúa como escudo protector asociada, principalmente, a la acción del fuego, a la presión demográfica, a las deforestaciones masivas y/o repoblaciones con especies excesivamente agresivas, como *Eucaliptus spp.* y *Pinus radiata*, a la apertura de caminos y pistas forestales sin ningún tipo de medida de protección de taludes y al abandono de los usos tradicionales asociados a las áreas de monte (Rodríguez Rodríguez y col., 2002).

Con la pérdida de la cobertura vegetal, los suelos quedan expuestos a los efectos del sol, la lluvia y del viento que, en última instancia, conducen a la degradación de un recurso vital, no sólo por su valor natural intrínseco, sino también por la importante incidencia que tiene sobre el mantenimiento y correcto desarrollo de la vegetación, la infiltración de agua y la recarga de los acuíferos, en una zona en la que son extremadamente importantes dada su escasez. A raíz de ello, se han realizado numerosas investigaciones sobre la erosión hídrica (Rodríguez Rodríguez y col., 2002 a, b y c; Guerra y col., 2004), la conservación del agua del suelo (Corcy y Kemper, 1968; Fernández Caldas y Tejedor, 1978; González y col., 1964; Tejedor y col., 2000, 2002 y 2003), sobre el efecto de las prácticas agrícolas sobre determinadas propiedades de los suelos (Armas-Espinel y col., 2003 a y b) y sobre la calidad del suelo en general (Arbelo y col., 2002; Rodríguez Rodríguez y col., 2002 a, b y c; Rodríguez Rodríguez 2005; Otto y col., 2006; Armas y col., 2007), esenciales hasta la actualidad en la lucha contra el proceso de desertificación que afecta a gran parte del archipiélago canario, que interfiere de forma negativa su desarrollo socio-económico.



## 5. Bibliografía

- Aguilera, N. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Mexico. In: Panel on Volcanic Ash Soils in Latin America, A. 6. Inter-American Institute of Agricultural Science. Turrialba. Costa Rica.
- Akratopulu, K., Verdonis, L., Lycourghiotis, A. 1988. Effect of temperature on the point of zero charge and surface dissociation constants of aqueous suspensions of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . In: Kinloch, D.L., Shoji, S., Beinroth, F.H., Eswaran, H. (Eds.), 9th Int. Soil Classification Workshop. Konno Printing, Sendai. Japan. pp. 60-73.
- Alvarado, A., Buol, S.W. 1975. Toposequence relationships of Dystrandepts in Costa Rica. *Soil Science Society of America Proc.* 39: 932-937.
- Amigo, J.M., Arriortua, M.A., Reventos, M.M. 1981. Nota sobre la composición química y mineralógica de los piroxenos monoclinicos existentes en los basaltos de Fruniz (Vizcaya). *Acta Geológica Hispánica*. 16 (3): 119-120.
- Ancochea, E., Giuliani, A., Villa, I. 1979. Edades radiométricas K/Ar del vulcanismo de la Región Central Española. *Estudios Geológicos*. 35: 131-135.
- Ancochea, E. 1982. Evolución espacial y temporal del vulcanismo reciente de España Central. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 675 pp.
- Ancochea, E. 1983. Enclaves ultramáficos de la Región Volcánica Central Española. *Rev. Mat. Proc. Geol.* 1: 337-339.
- Ancochea, E., Muñoz, M., Sagredo, J. 1984. Las manifestaciones volcánicas de Cofrentes y Picassent. *I Congreso Español de Geología*. 3: 1-13.
- Ancochea, E., Nixon, P.H. 1987. Xenoliths in the Iberian Peninsula. En: Nixon, P.H. (Eds.). *Mantle Xenoliths*. John Wiley and Sons. Chichester. 119-124.
- Ancochea, E., Huertas, M.J. 2002. Nuevos datos geocronológicos y geoquímicos de las manifestaciones volcánicas de Picassent y Cofrentes (Valencia). *Geogaceta*. 32: 31-34.
- Ancochea, E., Barrera, J.L., Bellido, F., Brändle, J.L., Cebriá, J.M., Coello, J., Cubas, C.R., De la Nuez, J., Doblas, M., Gómez, J.A., Hernán, F., Herrera, R., Huertas, M.J., López-Ruiz, J., Martí, J., Muñoz, M., Sagredo, J. 2004. Canarias y el vulcanismo neógeno peninsular. En: Vera, J.A. (Eds.). *Geología de España*. SGE-IGME. Madrid. 635-682.
-

- Aparicio, A., Mitjavilla, J.M., Araña, V., Villa, I.M. 1991. La edad del volcanismo de las islas Columbrete Grande y Alborán (Mediterráneo occidental). *Boletín Geológico y Minero*. 102: 562-570.
- Aparicio, A., García, R. 1995. El volcanismo de las islas Columbretes (Mediterráneo occidental. Quimismo y mineralogía. *Boletín Geológico y Minero*. 106: 64-84.
- Aran, D., Zida, M., Jeanroy, E., Herbillon, A.J. 1998. Influence of parent material and climate on andic properties of soils in a temperate montane region (Vosges, France). *European Journal of soil Science*. 46: 269-281.
- Aran, D., M. Gury, and E. Jeanroy. 2001. "Organo-metallic complexes in an Andosol: a comparative study with a Cambisol and Podzol". *Geoderma*. 99:65-79.
- Araña, V., López Ruiz, J. 1974. Vulcanismo: dinámica y petrología de sus productos. Ediciones Istmo. Madrid. 481 págs.
- Araña, V., Aparicio, A., Martín-Escorza, C., García-Cacho, L., Ortiz, R., Vaquer, R., Barberi, F., Ferrara, G., Albert, J., Gassiot, X. 1983. El volcanismo Neógeno-Cuaternario de Cataluña: caracteres estructurales, petrológicos y geodinámicos. *Acta Geológica Hispánica*. 18: 1-17.
- Arbelo, C.D., Rodríguez Rodríguez, A., Guerra, J.A., Mora, J.L. 2002. "Calidad del suelo y sucesión vegetal en Andosoles forestales de las Islas Canarias". *Edafología*. 9 (1): 31-38.
- Armas, C.M., Santana, B., Mora, J.L. Notario, J.S., Arbelo, C.D., Rodríguez Rodríguez, A. 2007. A Biological Quality Index for volcanic Andosols and Aridisols (Canary Islands, Spain): Variations related to the ecosystem degradation. *Soil of the Total Environment*. 378: 238-244.
- Armas-Espinel, S., Hernández-Moreno, J.M., Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M. 2003 a. Physical properties of "sorriba"-cultivated volcanic soils from Tenerife in relation to andic diagnostic parameters. *Geoderma*. 117: 297-311.
- Armas-Espinel, S., Hernández-Moreno, J.M., Regalado, C.M. 2003 b. Evaluación de la erosión en suelos volcánicos cultivados y su relación con algunas propiedades físicas. En: Álvarez-Benedi, J., Marinero, P. (eds.). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. VII: 125-130.
- Armas-Espinel, S., Regalado, C.M., Hernández-Moreno. 2004. Response of physical properties of Andisols and andic soils from Tenerife to saline and sodic treatments. In: Óskarsson, H., Arnalds, O. (Eds.). *Volcanic Soil Resources in Europe*. COST Action 622 final meeting. Rala Report no. 214. 117-118.
- Arnalds, O. 2004. Volcanic soils of Iceland. *Catena*. 56: 3-20.



- Arnold, R.W. 1988. The world wide distribution of Andisols and the need for the Andisol order in Soil Taxonomy. In: Soil Classification Workshop, Japan 1987. SMSS, Washington DC. pp 5-12.
- Austin, M.E. 1948. Reconnaissance soil survey of Japan – Kanto plain area. Gen. Headquarters. SCAP. Natural Resources Section Report 110-A. pp. 19-22.
- Auxtero, E., Madeira, M., Sousa, E. 2004. Variable charge characteristics of selected Andisols from Azores, Portugal. *Catena*. 56: 11-125.
- Auxtero, E., Madeira, M., Sousa, E. 2008. Phosphorus sorption maxima and desorbability in selected soils with andic properties from the Azores, Portugal. *Geoderma*. 144: 535-544.
- Azambre, B., Rossy, M. 1976. Le magmatisme alcalin d'âge crétacé dans les Pyrénées occidentales et l'Arc basque: ses relations avec le métamorphisme et la tectonique. *Bull. Soc. Géol. France*, 18: 1725-1728.
- Azambre, B., Rossy, M., Albareda, F. 1992. Petrology of the alkaline magmatism from the Cretaceous North Pyrenean Rift Zone (France and Spain). *European J. Miner.* 4: 813-834.
- Bache, B.W., Williams, E.G. 1971. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science*. 22 (3): 290-301.
- Baert, G., Van Ranst, E. 1998. Exchange properties of highly weathered soils of the Lower Congo. Malays. *Journal of Soil Science*. 2: 31-44.
- Baldwin, M., Kellogg, C. E., Thorp, J. 1938. Soil Classification. Soils and Men. U.S. Department of Agriculture. Yearbook, U.S. Govt. Print. Office. Washington DC. pp. 979-1001.
- Barrow, N.J. 1987. Reactions with variable-charge soils. Special issue. *Fertilizer Research*. 14: 49-53.
- Batista-Gonzales, A.B., Hernandez, J.M., Fernández, E., Herbillon, A.J. 1982. Influence of silica content on the surface charge characteristics of allophanic clays. *Clays and Clay Miner.* 30: 103-110.
- Bech, J., Segalen, P., Quantin, P. 1974. Sur la présence d'andosols à Olot (Gerona, Espagne). *C.R. Académie Sciences Paris*. 278: 1341-1344.
- Bech, J., Quantin, P., Segalen, P. 1976 a. Etude des Andosols d'Olot (Gerona, Espagne). Première partie : Géologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques. *Cah. ORSTOM, ser. Pédologie*. XIV (1): 73-87.
- Bech, J., Quantin, P., Segalen, P. 1976 b. Etude des Andosols d'Olot (Gerona, Espagne). Deuxième partie : caractéristiques minéralogiques. *Cah. ORSTOM, ser. Pédologie*. XIV (2): 95-111.
-

- Bech, J., Fedoroff, N., Sole, A. 1977. Etude des Andosols d'Olot (Gerona, Espagne). 3<sup>e</sup> partie : micromorphologie. *Cah. ORSTOM, ser. Pédologie*. XV (4): 381-390.
- Berding, F.R. 1997. Third level modifiers for the major soil groups of Andosols, Phaeozems and Podzols. Working Paper. FAO/AGLS. Rome.
- Boess, J., Hoppe, A. 1986. Mesozoischer Vulkanismus in Nordspanien: Rifting im keuper und KreideVulkanismus an Transform-Störungen. *Geol. Rundschau*. 75: 353-369.
- Bonadonna, F.P., Villa, I. 1984. Estudio geocronológico del vulcanismo de las Higueruelas. *Actas I Reunión Est. Reg. Castilla-La Mancha*. 3: 49-253.
- Boudot, J.P., Bel Hadj, B.A., Steiman, R., & Seigle-Murandi, F. 1989. Biodegradation of synthetic organo-metallic complexes of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios. *Soil Biology and Biochemistry*. 21: 961-966.
- Brimhall, G.H., Lewis, C.J., Ford, C., Bratt, J., Taylor, G., Warin, O. 1991. Quantitative geochemical approach to pedogenesis – importance of parent material reduction, volumetric expansion and eolian influx in laterization. *Geoderma*. 51: 51-91.
- Buondonno, C. 1964. The soils of Napoli province. An Agrochemical survey. *Ann. Fac. Agr. Protici*. 29: 221-251.
- Buurman, P., de Boer, K., Pape, Th. 1997. Laser diffraction grain-size characteristics of Andisols in perhumid Costa Rica: the aggregate size of allophane. *Geoderma*. 78: 71-91.
- Buurman, P., Peterse, F. & Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils – A pyrolysis-GC/MS study of Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science*, 58, 1330-1347.
- Cabanis, J. A., Le Fur Balouet, S. 1990. Le magmatisme Crétacé des Pyrénées-Apport de la géochimie des éléments en traces-conséquences chronologiques et géodynamiques. *Bull. centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*. 14: 155-184.
- Calvo de Anta, R., García-Rodeja, E., Macías, F. 1983. Mineralogical variability in weathering microsystems of a granitic outcrop of Galicia (Spain). *Catena*. 10: 341-236.
- Calvo de Anta, R., Macías, F. 1993. Rôle des processus pédogénétiques dans le maintien de la qualité des eaux superficielles en zones tempérées humides. Exemple des sols acides sur roches granitiques et schisteuses de la Galice (NW Espagne). *C.R. Académie Science Paris*. 316 : 799-805.

- Calvo de Anta, R., y Macías, F. 1998. Mapa de Solos de Galicia. Escala 1: 50.000. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- Campos Cascaredo, A., Oleschko, K., Cruz Huerta, L., Etchevers, B.J.D., Hidalgo, M.C. 2001. Estimation of allophane and its relationship with other chemical parameters in Mountain Andisols of the volcano Cofre de Perote. *Terra*. 19 (2): 105-116.
- Camps Arbostain, M., Barreal, M. E. y Macías, F. 2001. Sulfate sorption in nonvolcanic Andisols and Andic soils from Galicia, NW Spain. *Geoderma*. 104: 75-93.
- Camps Arbostain, M., Martínez de Arano, I., Mendarte, S., Aizpurua, A., Pinto, M. 2004. Pautas para inducir una acumulación adicional de Carbono orgánico en biomasa forestal y en suelos agrícolas, pascícolas y forestales en la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Edafología*. 11(2): 171-196.
- Cann, J. R. 1970. New model for the structure of the ocean crust. *Nature*. 226: 928-930.
- Carballeira, A., Devesa, C., Retuerto, R., Santillán, E., Uceda, F. 1983. Bioclimatología de Galicia. Fundación Pedro Barrié de la Maza. La Coruña. 361 pp.
- Carracedo, M., Larrea, F.J., Alonso, A. 1999. Estructura y organización de las coladas submarinas: características de las lavas almohadilladas de edad cretácica que afloran en la cordillera Vasco-Cantábrica. *Estudios Geológicos*. 55: 209-222.
- Castañares, L. M., Robles, S., Vicente Bravo, J. M. 1997. Distribución estratigráfica de los episodios volcánicos submarinos del Albense-Santoniense en la Cuenca Vasca (sector Gemika-Plentzia, Bizkaia). *Geogaceta*. 22: 43-46.
- Castañares, L. M., Gimeno, D. y Robles, S. (1998). Fenómenos de interacción magma-sedimento (peperitización) en el sistema volcánico submarino de la formación Errigoiti (Albiense-Santoniense de Vizcaya). *Bol. Soc. Esp. Miner.* 21-A: 60-61.
- Cebriá, J.M., López-Ruiz, J., Doblas, M., Oyarzum, R., Hertogen, J., Benito, R. 2000. Geochemistry of the Quaternary alkali basalts of Garrotxa (NE Volcanic Province, Spain): a case of double enrichment of the mantle lithosphere. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 102: 217-235.
- Celik, I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Research*. 83: 270-277.
- Chadwik, O.A., Hendricks, D.M., Nettleton, W.D. 1987. Silica and duric soils: I. A depositional model. *Soil Science Society of America Journal*. 51: 975-982.
-

- Chadwick, W. W., Embley, R. W. 1994. Lava flows from a mid-1980s submarine eruptions on the Cleft segment, Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*. 99 (3): 4761-4776.
- Choudhary, M.A., Baker, C.J. 1994. Overcoming constraints to conservation tillage in New Zealand. In: Carter, M.R. (Ed.). *Conservation Tillage in Temperate Agroecosystems*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 183-207.
- Churchman, G.J., Tate, K.R. 1987. Stability of aggregates of different size grades in allophanic soils from volcanic ash in New Zealand. *Catena*. 38. 19-27.
- Cline, M.G., 1979. "Soil Classification in the Unites States". Agronomy Mimeo 79-12. Cornell University. Ithaca, 207 pp.
- Colmet-Daage, F., Cucalon, F., Delaune, M., Gautheyrou, J. y M., Moreau, B. 1967. Caractéristiques de quelques sols d'équateur dérivés de cendres volcaniques. II Conditions de formation et d'évolution. *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*. 5: 353-392.
- Colmet-Daage, F., de Kimpe, C., Delaune, M., Gautheyrou, J. y M., Sieffermann, G., Fusil, G. 1970. Caractéristiques de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la côte pacifique du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, Série Pédologie*. 8: 113-172.
- Conte, P., Piccolo, A., van Lagen, B., Buurman, P., de Jager, P.A. 1997. Quantitative aspects of solid-state <sup>13</sup>C-NMR spectra of humic substances from soils of volcanic Systems. *Geoderma*. 80: 327-338.
- Cuevas, J., Garrote, A., Tubia, J.M. 1981. Análisis y significado de diferentes tipos de estructuras en el magmatismo del Cretácico Superior de la cuenca Vasco-Cantábrica (1ª parte). *Munibe*. 33: 1-20.
- Cuevas, J., Tubia, J.M. 1984. Análisis y significado de diferentes tipos de estructuras en el magmatismo del Cretácico Superior de la cuenca Vasco-Cantábrica. *Munibe*. 36: 93-97.
- Delgado, M., Íñiguez, J., Aguilar, J., Dorronsoro, C., Linares, J., Guardiola, J. L. 1972. Estudio edafológico de la Isla de Alborán. En, Universidad de Granada: La Isla de Alborán. Observaciones sobre mineralogía, edafología, nematodología, botánica y zoología, pp. 13-79. Secretariado de Publicaciones (Universidad de Granada). Granada.
- Duchaufour, P., Souchier, B. 1966. Sols Andosoliques et roches volcaniques des Vosges. *Science Terre*. 11: 345-365.
- Egawa, T. 1977. Properties of soils derived from volcanic ash. In: Ishizuka, Y., Black, C.A. (Eds.) *Soils derived from volcanic ash in Japan*. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). Mexico. 10-63.

- Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 50 : 627-633.
- FAO-UNESCO. 1974. Key to soil units for the new soil map of the World. Legend 1. FAO. Rome.
- FAO-UNESCO. 1988. Key to soil units for the new soil map of the World. Revised Legend. FAO. Rome.
- FAO-UNESCO. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resource. Rep. 103. FAO. Rome.
- FAO-UNESCO. 2006. World Reference Base for Soil Resources. First update 2007. A framework for International Classification, Correlation and Communication. World Soil Resource. Rep. 103. FAO. Rome.
- Fernández-Caldas, E., Guerra-Delgado, A. 1971. Condiciones de formación y evolución de los suelos de Tenerife. *Anales de Edafología y Agrobiología*. XXX: 5-6.
- Fernández-Caldas, E., Tejedor, M. 1975. Andosoles de las Islas Canarias Occidentales. Confederación Española de Cajas de Ahorros. España.
- Fernández-Caldas, E., Tejedor, M., Quantin, P. 1979. Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Tenerife (I. Canaries). 1<sup>ère</sup> Partie : Caractéristiques morphologiques et physico-chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVII (1): 37-46.
- Fernández-Caldas, E., Rodríguez Hernández, C.M. 1978. Suelos formados sobre materiales volcánicos (Islas Canarias). Aridisoles: Natric Calciorthids. *Anales de Edafología y Agrobiología*. XXXVII (7-8): 717-730.
- Fernández-Caldas, E., Quantin, P., Tejedor, M. 1981. Séquences climatiques de sols dérivés de roches volcaniques aux Iles Canaries. *Geoderma*. 26 : 47-62.
- Fernández-Caldas, E., Tejedor, M., Quantin, P. 1982. Suelos de regiones volcánicas. Tenerife. Islas Canarias. Colección Viera y Clavij no. IV. Universidad de la Laguna. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. España.
- Fernández-Caldas, E., Tejedor, M. 1987. Mulch farming in the Canary Islands. In: Wachira, J.K., Notholt, A.J.G. (eds.). *Agrogeology in Africa. Proc. Int. Seminar, Zomba, Malawi. CSC. Technical Publication. Vol. 226. London. 242-256 pp.*
- Fernández-Caldas, E., Tejedor, M., Jiménez, C. 1987. Soil Types in the arid zones of the Canary Islands. *Catena*. 14: 317-324.
-

- Flach, K. 1965. Genesis and morphology of ash-derived soils in U.S.A. In: World Soil Resources Report 14. FAO-Unesco. 61-70.
- Fox, R.L. 1980. Soils with variable charge: Agronomic and fertility aspects. In: Theng, B.K.G. (ed.). Soils With Variable Charge. Lower Hutt, New Zealand. *New Zealand Society of Soil Science*. pp. 195-224.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Tillage Research*. 66: 197-205.
- Fúster, J.M. 1975. Las Islas Canarias: un ejemplo de evolución espacial y temporal del vulcanismo oceánico. *Estudios Geológicos*. 14: 431-441.
- Gallardo, J.F. García Sánchez, A., Saavedra, J. 1973. Properties of Andosols of the Sierra de Francia (western Spain). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 32: 1135-1141.
- Gallardo-Millán, J.L., Ancochea, E., Pérez-González, A. 2002. Secuencia magnetoestratigráfica y edad de los materiales volcánicos de Poblete (Ciudad Real). *Geogaceta*. 32: 35-38.
- García-Rodeja, E., Macías, F. 1983. Influencia de los componentes no cristalinos en algunas propiedades de los suelos formados sobre rocas graníticas de Galicia. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 6: 237-253.
- García-Rodeja, E., Macías, F. 1984. Caracterización de los suelos ácidos (Podzoles, Andosoles, Suelos Aluminicos) de Galicia. Relación con los procesos edafo-geoquímicos. *I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. 589-602.
- García-Rodeja, E., Macías, F., Guitián Ojea, F. 1984. Reacción al NaF de los suelos de Galicia. IV. Suelos desarrollados sobre esquistos del Complejo de Órdenes, rocas básicas y metabásicas. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 43: 1311-1337.
- García-Rodeja, E., Macías, F., Guitián Ojea, F. 1985. Reacción al NaF de los suelos de Galicia. V. Relación con el material de partida y los procesos edafogénesis. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 44: 357-368.
- García-Rodeja, E. 1985. Sobre la clasificación de Andosoles y su existencia en materiales no volcánicos de Galicia (NO de España). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 44: 1651-1661.
- García-Rodeja, E., Silva, B., García, C., Macías, F. 1986. Propiedades de los suelos desarrollados sobre las anfíbolitas de "Santiago-Ponte Ulla". *Anales de Edafología y Agrobiología*. 45: 1271-1298.
- García-Rodeja, E., Silva, B.M., Macías, F. 1987. Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *European Journal of Soil Science*. 38 (4): 573-591.

- García-Rodeja, E., Novoa, J.C., Pontevedra, X., Martínez-Cortizas, A., Buurman, P. 2004. Aluminium fractionation of European volcanic soils by dissolution techniques. *Catena*. 56: 155-183.
- Gillman, G., Bakker, P. 1979. The measurement of surface charge characteristics of low activity clay soils. In: Beinroth, F.H., Panichapong, S. (Eds.), Proc. of 2nd International Soil Classification Workshop Part II. Soil Survey Division, Land Development Department. Bangkok, Thailand. pp. 77– 90.
- Gisbert, J. 1987. Clima y suelo de las Islas Columbretes. En: Islas Columbretes. Contribución al Estudio de su Medio Natural. 56-94.
- González, F., Kress, M., García, J., Higuera, A. 1964. El “mulch” en los cultivos enarenados de Canarias. Instituto de Hidrogeología Centro de Estudios Hidrográficos. 1-22 pp.
- González-Pérez, J.A., Arbelo, C.D., González-Vila, F.J., Rodríguez Rodríguez, A., Almendros, G., Armas, C.M., Polvillo, O. 2007. Molecular features of organic matter in diagnostic horizons from Andosols as seen by analytical pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 80 : 369-382.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M., Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 74: 367-385.
- Groenendijk, F.M., Condron, L.M., Rijkse, W.C. 2002. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils. *Geoderma* 108: 91-100.
- Guerin, G., Benhamou, G., Mallarach, J. M. 1986. Un exemple de fusió parcial en medi continental. El vulcanisme quaternari de Catalunya. *Vitrina*. 1: 19-26.
- Gutián Ojea, F. 1967. Suelos de la zona húmeda española. I. Tipos principales y sus relaciones genéticas. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 26: 1369-1378.
- Hewitt, A.E. 1992. New Zealand Soil Classification. DSIR Land Resources Scientific Report 19. Lower Hutt.
- Hewitt A.E. 1998. New Zealand Soil Classification. 2nd edition. Landcare Research Science Series No. 1. Manaaki Whenua Press. Lincoln. Canterbury.
- Houghton, R.A., 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990. *Tellus*. 50B: 298-313.
- Houghton, R.A., Skole, D.L., Nobre, C.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T., Chomentowski, W.H. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*. 403: 301-304.
-

- Hunter, C.R., Frazier, B.E., Busaca, A.J. 1987. Lytell Series: a non-volcanic Andisol. *Soil Science Society of American Journal*. 51: 376-383.
- ICOMAND (International Committee for Andosols). 1986. Circular Letter no. 8. New Zealand Soil Bureau, Lower Hutt.
- IKT, Nekazal Ikerketa eta Teknologia, S.A. <http://www.nekanet.net>
- Íñiguez, J., Barragán, E. 1974. Andosoles desarrollados sobre filitas en Ulzama (Navarra). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 33: 1055-1068.
- Isbell, R.F. 1996. The Australian Soil Classification. CSIRO. Collingwood. Victoria.
- Jahn, R. 1991. Intensity and velocity of soil forming process in volcanic soils in the semiarid climate in Lanzarote (Spain). *Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.* 66 (I): 51-58.
- Jersak, J. Amundson, R., Brimhall, G. 1995. A mass balance analysis of podzolization: examples from the northeastern United States. *Geoderma*. 66: 15-42.
- Juteau, T. 1993. Le volcanisme des dorsales océaniques. *Memoirs of the Geological Society of France*. 163: 81-98.
- Kawai, K. 1969. Mocomorphological studies of Andosols in Japan. *Bulleting of Natural Institute of Agricultural Sciences*. Series B. 20: 77-154.
- Kay, B.D. 2000. Soil structure. In: Sumner, E.M. (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton London. New York. Washington. D.C. pp. A229-A264.
- Kennish, M. J., Lutz, R. A. 1998. Morphology and distribution of lava flows on mid-ocean ridges: a review. *Science Reviews*. 43: 63-90.
- Koning, H. 1966. Les types des roches basiques et ultrabasiques qu'on rencontre dans la partie occidentale de la Galice (Espagne). *Leid. Geol. Med.* 36: 235-242.
- Lai, C.Y., Leung, K.W. 1967. The physical and chemical properties of Ando soils in Yungmingshan. *Journal of Taiwan Agricultural Research*. 16: 1-7.
- Lamolda, M. A., Mathey, B., Rossy, M., Sigal, J. 1983. La edad del vulcanismo de Vizcaya y Guipúzcoa. *Estudios Geológicos*. 39: 151-155.
- Layden, B. 1986. Some problems with podzols. *MZ Soil News*. 37: 77-79.



- Leamy, M.L., Smith G.D., Colmet-Daage, F., Ottawa, M. 1980. The morphological characteristics of andisols. In: Theng B. K. G. (Ed.), *Soils with Variable Charge*. New Zealand Society of Soil Science & New Zealand Department of Scientific & Industrial Research, Soil Bureau, Lower Hutt, pp.17-34.
- Leamy, M.L. 1984. Andisols of the world. Congreso Internacional de Suelos Volcánicos. Comunicaciones. Universidad de La Laguna Secretariado de Publicaciones. 13: 368-387.
- Leamy, M.L., Kinloch, D.I., Parfitt, R.L. 1990. International Committee on Andisols: Final Report. SMSS, Technical Monograph No. 20. 165 pp.
- Lendínez, A., Terra Dávila, A. 1980. Mapa y memoria explicativa de la Hoja 740 (Jalance) del Mapa Geológico de España, a escala 1: 50.000. (2ª Serie). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Liverovskii, Yu A. 1971. Volcanic ash soils of Kamchatka. *Pochvovedenie*. 6: 3-11.
- López-Ruiz, J., Cebriá, J.M. 1987. Geotermometría de las rocas ígneas. Su aplicación a los basaltos alcalinos de la región volcánica del NE de España. *Estudios Geológicos*. 43: 149-168.
- López-Ruiz, J., Rodríguez-Badiola, E. 1980. La región volcánica neógena del sureste de España. *Estudios Geológicos*. 36: 5-63.
- López-Ruiz, J., Rodríguez-Badiola, E., Cebriá, J.M. 1986. Petrogénesis de los basaltos alcalinos de la Garrotxa, región volcánica del NE de España. *Geogaceta*. 1: 28-31.
- Lorenzoni, P., Mirabella, A., Bidini, D., Lulli, L. 1995. Soil genesis on trachytic and leucititic lavas of Cimini volcanic complex (Latium, Italy). *Geoderma*. 68: 79-99.
- Loveland, P.J., Bullock, P. 1975. "Crystalline and amorphous components of the clay fractions in brown podzolic soils". *Clay mineralogy*. 10: 451-469.
- Lowe, D.J. 1997. Teaching clays: from ashes to allophane. In: Churchman, G.J., Fitzpatrick, R.W., Eggleton, R.A. (Eds.), *Clay Controlling the Environment*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Clay Conference. Adelaide, Australia. CSIRO Publishing, Australia. Pp. 19-23.
- Luna, C. 1969. Genetic aspects of Colombian andosols. In: Panel of Volcanic Ash Soils in Latin America, A.3. Inter-American Institute of Agricultural Science. Turrialba. Costa Rica.
- Macías, F., Puga, M., Guitián Ojea, F. 1978a. Suelos de la zona húmeda española. IX. Estudio de una catena sobre gabros. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 37:187-203.
-

- Macías, F., Puga, M., Guitián Ojea, F. 1978b. "Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia". *Anales de Edafología y Agrobiología*. 37:187-203.
- Macías, F., Guitián Ojea, F. 1980. La presencia de Gibbsita en los suelos de clima templado: una revisión de los conocimientos actuales (I). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 39: 301-341.
- Macías, F., Guitián Rivera, F., García-Rodeja, E., Vidal Romarí, J.R. 1980 a. Componentes no cristalinos y cristalinos (Gibbsita y caolinita) en los productos de neoformación de las rocas graníticas de Galicia. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 1: 51-67.
- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1980 b. El factor material de partida en los suelos de Las Mariñas. 1. Alteración de rocas metabásicas. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 1: 205-223.
- Macías, F. 1981. Formation of gibbsite in soils and saprolites at temperate humid zones. *Clay Minerals*. 16: 43-52.
- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1981 a. Alteración de los esquistos de Las Mariñas en medios confinados y con humedad alternante. *Acta Científica Compostelana*. 17: 247-263.
- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1981 b. El factor del material de partida en los suelos de Las Mariñas 2. Alteración de los esquistos en medios bien drenados. *Acta Científica Compostelana*. 17: 265-292.
- Macías, F., Calvo de Anta, R., García, C., García-Rodeja, E., Silva, B. 1982. El material original: su formación e influencia en las propiedades de los suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 41: 1747-1768.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. 1992a. Caractérisation pédogéochimique des sols de la Galice (NW Espagne) en relation avec la diversification lithologique. Mise en évidence d'un milieu de transition entre les domaines tempérées et subtropicaux humides. *C.R. Académie Science Paris*. 315 : 1803-1810.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. 1992b. Suelos de la provincia de La Coruña (Mapa escala 1: 200.000. Diputación Provincial de La Coruña (Eds.). 85 pp.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. 2001. Los Suelos de Galicia. En: Atlas de Galicia. Vol. I. Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia. Consellería de Presidencia. Xunta de Galicia. 174-217.
- Mariano, J.A. 1965. Volcanic ash soils of Philippines. In: World Soil Resources Report 14. FAO-Unesco. 53-55.
- Marbut, C.F. 1927. A scheme for soil classification. Proc. 1<sup>st</sup> Intr. Cong. *Soil Science*. Comm. 5: 1-31.

- Martí Henneberg, J.L. 1984. Emilio Huguet del Villar (1871 – 1951): Cincuenta años de la lucha por la ciencia. Universidad de Barcelona.
- Martín, A, Ruiz, P.A., Vera, J.A. 1992. Factors controlling Cretaceous turbidite depositon in the Betic Cordillera. *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 5: 53-80.
- Martin, J.P., and K. Haider. 1986. "Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon". In: P.M. Huang and M. Schnitzer (ed.). Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes. Soil Sci. Soc. Am. Special Publication 17. ASA, Madison, WI, pp. 283-304.
- Martínez-Cortizas, A. 1987 a. Clima y clima del suelo de la provincia de La Coruña. En: Suelos cultivables de la provincia de La Coruña. Excma. Diputación Provincial de LA Coruña. Mem. mec.
- Martínez-Cortizas, A. 1987 b. Zonas agroecológicas de Galicia: Zonas climáticas FAO. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 46: 521-538.
- Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. 2000. Atlas Bioclimático de Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente. 203 pp.
- Martini, J.A. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Central America. In: Panel of Volcanic Ash Soils in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences. Turrialba. Costa Rica.
- McConaghy, S. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in the Antilles. In: Panel of Volcanic Ash Soils in Latin America. Inter-American Institute of Agricultural Sciences. Turrialba. Costa Rica.
- Mizota, C., van Reeuwijk, L.P. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Soil Monograph, vol. 2. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen. 113 pp.
- Moore, J. G. 1965. Petrology of deep-sea basalt near Hawaii. *American Journal of Science*. 263: 40-52.
- Mozaffari, M., Sims, J.T. 1994. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-base agriculture. *Soil Science*. 157: 97-107.
- Nanzoy, M., Dahlgren, R., Shoji, S. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. pp 145 – 187. In: Shoji, S., Nanzoy, M., Dahlgren, R. (Eds.). Volcanic ash soils, genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science. 21. Elsevier. The Netherlands.
-

- Negrin, M.A., Espino-Mesa, M., Hernandez-Moreno, J.M. 1996. Effect of water:soil ratio on phosphate release: P, aluminium and fulvic acid associations in water extracts from Andisols. *European Journal of Soil Science*. 47: 385-393.
- Norrish, K., Pickering, J.G. 1983. Clay minerals. In: Division of Soils, CSIRO: Soils: an Australian viewpoint. CSIRO. Merlbourne /Ac. Press London: 281-308.
- New Zealand Soil Bureau. 1968. Soils of New Zealand. Parts 1, 2 and 3. *New Zealand Soil Bulletin* 26.
- Olarieta, J.R., Rodríguez-Ochoa, R., Arostegui, J., Besga, G., Aizpurua, A. 2007. Suelos desarrollados sobre rocas volcánicas en la Comarca de Lea-Artibai (Bizkaia). En: XXVI Reunión Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Durango (Bizkaia). 57 pp.
- Óskarsson, H., Arnalds, O. (Eds.). 2004. Volcanic Soils Resources in Europe. COST Action 622 final meeting. Abstracts. Rala Report no. 214. Agricultural Research Institute. Reykjavík. Iceland. 129 pp.
- Otto, R., Krüsi, B.O., Burga, C.A., Fernández Palacios, J.M. 2006. Old-field succession along a precipitation gradient in the semi-arid coastal region of Tenerife. *Journal of Arid Environment*. 65(1): 156-178.
- Parfitt, R.L., Atkinson, R.J., Smart, R. 1975. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. *Soil Science Society of America Proc.* 39: 837-841.
- Parfitt, R.L. 1980. Chemical properties of variable charge soils. In: Theng, B.K.G. (ed.). *Soils With Variable Charge*. Lower Hutt, New Zealand. *New Zealand Society of Soil Science*. pp. 167-194.
- Parfitt, R.L., Furkert, R.J., Henmi, T. 1980. Identification and structure of two types of allophane from volcanic ash soils and tephra. *Clays and Clay Mineralogy*. 28: 328-334.
- Parfitt, R.L., Henmi, T. 1980. Structure of some allophanes from New Zealand. *Clays and Clay Mineralogy*. 28: 285-295.
- Parfitt, R.L., M., Russell, G.E., Orbell. 1983. Weathering sequence of soil from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma* 29, 41-57.
- Parfitt, R.L., Wilson, A.D. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In: Fernandez Caldas, E., Yaalon, D.H. (Eds.), *Volcanic Soils*. Catena Suppl. 7: 1-8.
- Parfitt, R.L., Childs, C.W. 1988. Estimation of forms of Fe and Al: a review, and analysis of contrasting soils by dissolution and Mössbauer methods. *Australian Journal of Soil Resources*. 26: 121-144.
- Parfitt, R.L. 1990. Allophane in New-Zealand — a review. *Australian Journal of Soil Research*. 28: 343-360.

- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S. & Shepherd, T.G. 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*. 75: 1-12.
- Parfitt, R.L., Klimbe, J.M. 1990. Conditions for formation of allophone in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 53: 971-977.
- Percival, H.J., Parfitt, R.L., Scott, N.A. 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important?. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 1623-1630.
- Perrott, K.W., R.G., Wise. 1993. An evaluation of some aspects of the iron oxide impregnated filter paper (Pi) test for available soil phosphorus with New Zealand soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 36:157-162.
- Powell HKJ, Hawke DJ. 1995. Free aluminium and aluminium complexation capacity of natural organic matter in acidic forest soil solutions from Canterbury, New Zealand. *Australian Journal of Soil Resources*. 33: 611-620.
- Puga, M. 1976. Estudio de una catena sobre gabros. Trabajo de Licenciatura. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Puga, M., Macías, F., Guitián, F. 1978. Pedological and Geochemical cycles in catena of Galicia (NW Spain). *Catena*. 5: 375-387.
- Puga, M. 1982. Estudio de los suelos sobre gabros. Tesis Doctoral. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Quantin, P., Fernández-Caldas, E., Gutiérrez, F., Tejedor, M., Delibrias, G. 1975. Problème du rajeunissement des sols issus de l'altération de roches volcaniques, par des éruptions récentes de cendres, aux, Nouvelles-Hébrides et aux Iles Canaries. *Bull. Assoc. Géogr.* N° 426.
- Quantin, P., Rodríguez Hernández, C.M., Fernández-Caldas, E., Rodríguez Pascual, C. 1976. Signification pédogénétique de l'attapulgite d'un sol à différenciation sa line de Tenerife (Iles Canaries), provenant d'altération de basalte. 4<sup>e</sup> Réunion annuelle des Sciences de la Terre. Paris. Pp. 13-16.
- Quantin, P., Tejedor, M., Fernández-Caldas, E. 1977. Climatoséquence de la région méridionale de l'île de Tenerife (I. Canaries). 1<sup>ere</sup> Partie: Ecologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Péd.* XV (4): 391-407.
- Quantin, P., Tejedor, M., Fernández-Caldas, E. 1978 a. Observations sur la présence de sols ferralitiques dérivés de matériaux volcaniques aux îles Canaries. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVI (2): 155-175.
-

- Quantin, P., Fernández-Caldas, E., Tejedor, M. 1978 b. Séquence climatique des sols récents de la région septentrionale de Tenerife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> Partie : Caractéristiques minéralogiques. Interprétation et classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVI (4): 397-412.
- Quantin, P., Dabin, B., Bouleau, A., Lulli, L., Bidini, D. 1985. Characteristics and genesis of two Andosols in central Italy. *Catena Suppl.* 7: 107 – 117.
- Quantin, P. 2004. Volcanic soils of France. *Catena.* 56: 95-109.
- Rico, M. 1965. Report on volcanic ash origin in Salvador. In: World Soil Resources Report 14. FAO-Unesco. 23-29.
- Rieger, S., Wunderlich, R.E. 1960. Soil survey and vegetation, northeastern Kodiak Island Area, Alaska. U.S. Department of Agricultural Soil Survey Service. 27-29.
- Ritchie, T.E. 1951. Reconnaissance soil survey of Japan – Summary. Gen. Headquarters. SCAP. Natural Resources Section Report 110-I. pp. 64. Illus., maps.
- Robson, D. y Cann, J. R. 1982. A geochemical model of mid-ocean ridge magma chambers. *Earth and Planetary Science Letters.* 60: 93-104.
- Rodríguez, J., Monturiol, F. 1973. Andosuelos de la provincia de Gerona. *Anales de Edafología y Agrobiología.* 32 (9): 10.
- Rodríguez Hernández, C.M., Fernández-Caldas, E., Fedoroff, N., Quantin, P. 1979. Les vertisols des îles Canaries Occidentales. Etude physico-chimique, minéralogique et micromorphologique. *Pédologie.* XXIX (1): 71 . 107.
- Rodríguez Rodríguez, A. 1977. Contribución al estudio de los suelos fersialíticos de las Islas Canarias Occidentales (Tenerife, La Palma). Tesis Doctoral. Universidad de la Laguna. Tenerife.
- Rodríguez Rodríguez, A., González, M.C., Hernández, L.A., Jiménez, C., Ortega, M.J., Padrón, P.A., Torres, J.M., Vargas, G.E. 1993 a. “Assessment of Soil Degradation in the Canary Islands (Spain)”. *Land Degradation and Rehabilitation.* 4: 11-20.
- Rodríguez Rodríguez, A., González, M.C., Hernández, L.A., Jiménez, C., Ortega, M.J., Padrón, P.A., Torres, J.M., Vargas, G.E. 1993 b. “Degradación y Conservación de Suelos en las Islas Canarias”. En: “Problemática Geoambiental y Desarrollo”. Ed. R. Ruiz. Universidad de Murcia. 415-423.

- Rodríguez Rodríguez, A., Jiménez, C., Ortega, M.J., Tejedor, M.L. 1998. "Soil degradation and desertification in the Canary Islands". En: "The soil is as a strategic resource: degradation processes and conservation measures". Geoforma Ediciones. Logroño. 13-22.
- Rodríguez Rodríguez, A. 2002. "Erosión y Desertificación". En: "Naturaleza de las Islas Canarias. Ecología y Conservación". (J.M. Fernández Palacios y J.L. Martín Esquivel Eds). Ed. Turquesa, S/C de Tenerife. 317-322.
- Rodríguez Rodríguez, A., Mora, J.L., Arbelo, C.D. 2002 a. Variation of the soil quality in plant succession of the coastal scrub of Tenerife (Canary Islands, Spain). In: Rubio, J.L., Morgan, R.P.C., Asins, S., Andreu, V. (eds.). Man and Soil at the Third Millennium. Geoforma Edit., Logroño. Spain. vol. (VII): 1185-1198.
- Rodríguez Rodríguez, A., Mora, J.L., Guerra, J.A., Arbelo, C.D., Sánchez, J. 2002b. An Ecosystemic Approach to Soil Quality Assessment. In: Faz, A., Ortiz, R., Mermut, A.R. (eds.) Sustainable Use and Management of Soils in Arid and Semiarid Regions. Quaderna Edit. Cartagena, Murcia (Spain). vol. (I): 193-208.
- Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A., Mora, J.L. 2002 a. "Erosión Hídrica en Andosols de la Islas Canarias". *Edafología*. 9 (1): 23-30.
- Rodríguez Rodríguez, A., Gorrín, S.P., Guerra, J.A., Arbelo, C.D., Mora, J.L. 2002 b. Mechanisms of soil erosion in andic soils of the Canary Islands. In: Jure (Ed.). Sustainable utilization of Global Soils and Water Resources. Tsinghua University Press. Beijing. Vol. I: 342-348.
- Rodríguez Rodríguez, A., Guerra, J.A., Gorrín, S.P., Arbelo, C.D., Mora, J.L. 2002 c. Aggregates stability and water erosion in Andosols of the Canary Islands. *Land Degradation and Development*. 13: 515-523.
- Rodríguez Rodríguez, A., Mora, J.L., Arbelo, C.D., Bordon, J. 2005. Plant succession and soil degradation in desertified areas (Fuerteventura; Canary Islands, Spain). *Catena*. 59: 117-131.
- Rodríguez Rodríguez, A., Arbelo, C.D., Guerra, J.A., Mora, J.L., Notario, J.S., Armas, C.M. 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. *Catena*. 66: 228-235.
- Rossy, M. 1988. Contribution a l' étude du magmatisme Mesozoïque du domaine Pyrénéen. Tesis Doctoral, Université de Franche-Comté, 368 págs.
- Rossy, M., Azambre, B., Albarede, F. 1992. REE and Sr-Nd isotope geochemistry of the alkaline magmatism from the Cretaceous North Pyrenean Rift Zone (France, Spain). *Chemical Geology*. 97: 33-46.
- Rutherford, G.K., 1962. The yellow-brown soils of the highlands of New Guinea. International Soil Science. Commissions IV and V. Trans. Joint Mtg. New Zealand. 343-349.
-

- Sánchez, A.P. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley and Sons.
- Sawyer, D.S., Henning, A.T., Shipp, S., Dunbar, R. 2005. A Data Rich Exercise for Discovering Plate Boundary Processes. *Journal of Geoscience Education*. 53 (1): 65-74.
- Scarciglia, F., de Rosa, R., Vecchio, G., Apollaro, C., Robustelli, G., Terrasi, F. 2007. Volcanic soil formation in Calabria (southern Italy): the Cecita Lake geosol in the late Quaternary geomorphological evolution of the Sila uplands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. In press.
- Schmincke, H.U. 1982. Volcanic and chemical evolution of the Canary Islands. En: Von Rad, U., Hinz, K., Sarnthein, M., Seibold (E. Eds.). *Geology of the Northwest African margin*. Springer. Berlín. 273-306.
- Scotney, P., Burges, R., Rutter, E.H. 2000.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of Cabo de Gata volcanic series and displacements on the Carboneras fault zone, SE Spain. *Journal of Geological Society*. 157: 1003-1008.
- Shepherd, T.G., Saggarr, S., Newman, R.H., Ross, C.W., Dando, J.L. 2001. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Resources*. 39: 465-489.
- Shin, Y.H. 1965. Volcanic ash soils of Korea. In: *World Soil Resources Report 14*. FAO-Unesco. 50-52.
- Shoji, S. y Ono, T. 1978. Physical and chemical properties and clay mineralogy of Andosols from Kitikami, Japan. *Soil Science*. 126: 297-312.
- Shoji, S., Fujiwara, Y., Yamada, I., Saigusa, M. 1982. Chemistry and clay mineralogy of Ando soils, Brown forest soils, and Podzolic soils formed from recent Towanda ashes, Northeastern Japan. *Soil Science*. 133: 69-86.
- Shoji, S. y Fujiwara, Y. 1984. Active Al and Fe in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: their forms, properties, and significance in clay weathering. *Soil Science*. 137: 216-226.
- Shoji, S. y Otowa, M. 1988. Distribution and significance of Andisols in Japan. In: D.I. Kinloch, S. Shoji, F.H. Beinroth and Eswaran (Editors). *Proc. Ninth Int. Soil Classification Workshop, Japan. 1987*. SMSS, Washington DC. Pp. 13-24.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R.A. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. *Developments in Soils Science* vol. 21, Elsevier, Amsterdam.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R.A., Quantin, P. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Science*. 161: 604-615.



- Simonson, R.W. 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America. Proc.* 23: 152-156.
- Simonson, R.W., Rieger, S. 1967. Soils of the Andept Suborder in Alaska. *Soil Science Society of America Proc.* 31: 692-699.
- Simonson, R.W. 1979. "Origin of the name *Ando soils*". *Geoderma*. 22: 333-335.
- Simonson, R.W., 1987. "Historical Aspects of Soil Survey and Soil Classification". *Soil Science Society of America*. Madison.
- Singleton, P.L., M., McLeod, H.J., Percival. 1989. Allophane and halloysite content and soil solution silicon in soils from rhyolitic volcanic material, New Zealand. *Australian Journal of Soil Research*. 27: 67-77.
- Smith, G.D. 1963. Objectives and assumptions of basic assumptions of the new soil classification systems. *Soil Science*. 69: 6-16.
- Smith, G.D. 1978. A preliminary proposal for the reclassification of Andepts an some Andic subgroups (Reprinted as: The Andisol proposal 1978. NZ Soil Bureau Record, 96. 1984).
- Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. 2007. XXVI Reunión Nacional de Suelos. Departamento de Agroecosistemas y Recursos Naturales. NEIKER – Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. 143pp.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1960. Soil Classification, a comprehensive system, 7<sup>th</sup> approximation. U.S. Government Printing Office. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1975. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. Agric. Handbook 346 US. Government Printing Office. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1983. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Program Leader. Tech. Monogr. 6. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1985. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Program Leader. Tech. Monogr. 6. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1987. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 6. 3<sup>th</sup> ed. U.S. Soil Management Support Services. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.
-

- 
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1990. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 19. 4<sup>th</sup> ed. Blacksburg, VA.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1992. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 19. 5<sup>th</sup> ed. Blacksburg, VA.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1994. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 19. 6<sup>th</sup> ed. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1996. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 19. 7<sup>th</sup> ed. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 1998. Keys of Soil Taxonomy. SMSS Tech. Monogr. 19. 8<sup>th</sup> ed. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 2003. Keys of Soil Taxonomy 9<sup>th</sup> ed. U.S. Department of Agriculture. Washington DC.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 2006. Keys of Soil Taxonomy 10<sup>th</sup> ed. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Washington DC.
- Sposito, G. 1984. The surface chemistry of soils. Oxford University Press.
- Sposito, G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press. New York. pp. 277.
- Sumner, M.E., Miller, W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: Bigham, J. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods. *Soil Science Society of America*. Madison. pp. 1201-1229.
- Swindale, L.D., Sherman, G.D. 1965. Hawaiian soils from volcanic ash. In: World Soil Resources Report 14. FAO-Unesco. 36-49.
- Tan, K.H. 1965. The Andosols in Indonesia. *Soil Science*. 99: 375-378.
- Tate, K.R., Yamamoto, K., Churchman, G.J., Meinhold, R., Newman, R.H. 1990. Relationships between the type and carbon chemistry of humic acids from some New Zealand and Japanese soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 36: 611-621
- Tejedor, M., Quantin, P., Fernández-Caldas, E. 1978 a. Séquence climatique des sols récentes de la région septentrionale de Tenerife (Iles Canaries). 1<sup>e</sup> Partie : Ecologie, morphologie, caractéristiques physiques et chimiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVI (3): 251-264.
-

- Tejedor, M., Fernández-Caldas, E. , Quantin, P. 1978 b. Climatoséquence de la région méridionale de l'île de Tenerife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> Partie : Caractéristiques minéralogiques ; interprétation et classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVI (1): 83-106.
- Tejedor, M., Quantin, P., Fernández-Caldas, E. 1979. Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Tenerife (Iles Canaries). 2<sup>e</sup> Partie : Caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVII (2): 119-127.
- Tejedor, M., Quantin, P., Fernández-Caldas, E. 1980. Séquence climatique des sols anciens de la région septentrionale de Tenerife (Iles Canaries). 3<sup>e</sup> Partie : Typologie, pédogenèse et classification. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* XVII (3): 185-193.
- Tejedor, M., Jiménez, C.C., Díaz, F. 2000. Optimización del espesor y tipo de mulch de cenizas volcánicas en la conservación del agua del suelo. Resultados preliminares. 11<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Conference. Buenos Aires.
- Tejedor, M., Jiménez, C.C., Díaz, F. 2002. Soil moisture regime changes in tephra-mulched soils: implications for Soil Taxonomy. *Soil Science Society of America Journal.* 66(1): 202-206.
- Tejedor, M., Jiménez, C.C., Díaz, F. 2003. Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma.* 117: 283-295.
- Theng, B.K.G., Churchman, G.J., Newman, R.H., 1986. The occurrence of interlayer clayorganic complexes in two New Zealand soils. *Soil Science.* 142: 262-266.
- Thorp, J. y Smith, G.D. 1949. Higher categories of soil classification: Order, suborder, and great soil groups. *Soil Science.* 67: 117.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science.* 33: 141-163.
- Tokashiki, Y., Wada, K. 1975. Weathering implications of the mineralogy of clay fractions of two Ando soils, Kyushu. *Geoderma.* 14: 47-62.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature.* 389: 170-173.
- Turner, B.L., Haygarth, P.M. 2000. Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types. *Soil Science Society of American Journal.* 64: 1090-1099.
- Twyford, I.T., Wright, A.C.S. 1965. The soil resources of the Fiji Islands. Government of Fiji. 570 pp.
-

- Ugolini, F.C., Dahlgren, R. 1987. The mechanism of podzolization as revealed by soil solution studies. In: Righi, D., Chauvell, A. (Eds.), Podzols et Podzolization. AFES et INRA, Paris. pp. 195-207.
- Valdés, A. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Peru. In: Panel of Volcanic Ash Soils in Peru. A.1. Inter-American Institute of Agricultural Sciences. Turrialba. Costa Rica.
- van Ranst, E., Utami, S.R., Verdoodt, A., Qafoku, N.P. 2008. Mineralogy of a perudic Andosol in central Java, Indonesia. *Geoderma*. 144: 379-386.
- van der Zee, S.E.A.T.M., van Riemsdijk, W.H. 1986. Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soils. *Geoderma*. 38: 293-359.
- Verde, J.R., Camps-Arbestain, M., Macías, F. 2005. Expression of andic properties in soils from Galicia (NW Spain) under forest and agricultural use. *European Journal of Soil Science*. 56: 53-63.
- Verde, J.R., Buurman, P., Martínez-Cortizas, A., Macías, F., Camps-Arbestain, M. 2008. NaOH-extractable organic matter of andic soils from Galicia (NW Spain) under different land use: A Pyrolysis GC/MS study. *European Journal of Soil Science*. 59: 1093-1110.
- Vidal Romarí, J.R., Fúster, J.M. 1974. Mapa y memoria explicativa de la hoja 642 (Islas Columbretes) del Mapa Geológico de España a escala 1: 50.000 (2ª Serie). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Wada, K., Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic material during the Quaternary. *Soil Science*. 116: 170-177.
- Wada, K., Higashi, T. 1976. The categories of aluminum- and iron-humus complexes in Ando soils determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*. 27: 357-368.
- Wada, K. 1977. Active aluminum in Kuroboku soils and non- and para-crystalline clays minerals. *Nendokagaku*. 27: 143-151.
- Wada, K., Gunjigake, N. 1979. Active aluminum and iron and phosphate adsorption in Ando soils. *Soil Science*. 128: 331-336.
- Wada, K. 1980. Mineralogical characteristics of Andisols. In: Theng, B.K.G. (Ed.), Soils with Variable Charge. New Zealand Society of Soil Science. Lower Hutt, New Zealand, pp. 87-107.
- Wada, K., Okamura, Y. 1980. Electric charge characteristics of and Al and buried Al horizon soils. *Soil Science*. 31: 307-314.
-

- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in Soil Environments*. 2<sup>nd</sup> ed. *Soil Science Society of America*. Madison. WI. pp. 1051-1087.
- Wall, A., Heiskanen, J. 2003. Water-retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland. *Forest Ecological Management*. 186: 21-32.
- Wells, G., Bryan, W. B., Pearce, T. H. 1979. Comparative morphology of ancient and modern pillow-lavas. *Journal of Geology*. 87: 427-440.
- Wilson, M.A., Barron, P.F., Goh, K.M., 1981. Cross polarisation <sup>13</sup>C NMR spectroscopy of some genetically related New Zealand soils. *Journal of Soil Science*. 32: 419-425.
- Wilson, M., Downes, H. 1991. Tertiary-Quaternary extension-related alkaline magmatism in Western and Central Europe. *European Journal of Petrology*. 32: 811-849.
- Wilson, M., Downes, H. 1992. Mafic alkaline magmatism associated with the European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*. 208: 173-182.
- Wright, A.C.S. 1965. The "Andosols" or "Humic Allophane" soils of South America. In: *World Soil Resources Report 14*. FAO-Unesco. 9-22.
- Yamanaka, K., Yamada, Y. 1964. Distribution of volcanic soils. In: *Volcanic ash soils in Japan*. Ministry of Agriculture and Forestry. Japanese Government. 4-7.
- Yamada, S. 1977. Distribution and morphology of soils derived from volcanic ash in Japan. In: Ishizuka, I., Black, C.A. (Eds.). *Soils derived from volcanic ash in Japan*. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). Mexico. 1-9.
- Yoshinaga, N., Aomine, S. 1962. Imogolite in some Ando Soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 8: 22-29.
- Zavaleta, A. 1969. Geographic distribution and characteristics of volcanic ash soils in Peru. In: *Panel of Volcanic Ash Soils in Latin America*. A.2. Inter-American Institute of Agricultural Sciences. Turrialba. Costa Rica.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A. & Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79: 117-161.
- Zeck, H.P., Maluski, H., Kristensen, A.B. 2000. Revised geochronology of the Neogene calc-alkaline volcanic suite in Sierra de Gata, Alborán volcanic province, SE Spain. *Journal of Geological Society*. 157: 75-81.
-

Zelazny, L.W., He, H., Vanwornhautd, A. 1996. Charge analysis of soils and anion exchange. In: Bigham, J.M. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America*. Madison. pp. 1231-1253.

# Capítulo 2

---

*Justificación y Objetivos*





## Justificación y Objetivos

---

### 1. Justificación

El estudio del suelo en España comienza su andadura en la primera mitad del s. XIX con los trabajos de Alonso de Herrera, quien promovió una clara renovación de la Ciencia del Suelo.

Una de las primeras aproximaciones científicas del concepto de suelo procede del campo de la Geología de manos de Juan Vilanova y Piera (1821 – 1893). En sus obras *“Geología aplicada a la Agricultura y a la Industria”*, escrita en 1860, y *“Geología Agrícola”*, publicada en 1879, se define el suelo como *“el resultado de la acción de los diferentes climas sobre los distintos materiales geológicos”*, aportando, además, algunos análisis originales sobre suelos españoles, en cuya interpretación se aprecia claramente la influencia de las ideas de Liebig y de la agronomía francesa.

Desde el campo de la Química cabe citar a D. Gregorio Rocabolano (1873 – 1941) quien realizó importantes estudios sobre la química coloidal, más concretamente sobre el movimiento browniano, y sobre la catálisis bioquímica del nitrógeno. En esta escuela de química coloidal también se formó Albareda, cuyas ideas fueron publicadas en la obra *“El Suelo”* (1940), donde se presenta el suelo como una roca que se altera por la *erosión* del clima y los organismos y diferenciándolo de los demás organismos naturales por una serie de propiedades específicas, entre las que, las superficiales eran las más importantes.

También hubo grandes aportaciones desde la Silvicultura y la Agricultura, con la creación, por Agustín Pascual y Torres Rojas en 1848, de la primera escuela de Ingenieros Forestales, muy influenciada por la ideas de Humblodt y de la escuela alemana de gran tradición forestal. En ella se propugnaba la visión integradora y armónica de los diferentes elementos, en la cual el suelo es un elemento clave que debía de ser conservado dado el papel que desempeña en la producción forestal y sobre la dinámica de las aguas superficiales. Con la creación de la Escuela Superior de Agricultura en 1866, la principal aportación al conocimiento del suelo se deriva de sus estudios de fertilización en parcelas experimentales así como de los análisis sistemáticos de los suelos que se comenzaban a realizar a partir de los últimos años del s. XIX.

---

Esta misma idea se plasmó en los estudios que realizó Huguet del Villar (1871 – 1951) a comienzos del s. XX, entre los años 1927 y 1932. Es, sin lugar a duda, el geógrafo español más destacado por sus aportaciones a la configuración como ciencia de la Edafología ([Marti Henneberg, 1984](#)) y el más claro representante español de las ideas de Dokuchaiev. Con una obra muy extensa, con más de cuarenta trabajos, sus mayores contribuciones a la Edafología son sus estudios sobre los factores de formación del suelo, con una visión más ponderada y equilibrada que la de sus contemporáneos, y la elaboración del Mapa de Suelos de la Península Ibérica a escala 1 : 1.000.000, que situó a España en primera línea de los trabajos cartográficos europeos.

Tras la Segunda Guerra Mundial, la Edafología en España se vio inmersa en un periodo de oscuridad, en parte consecuencia de que las ideas de Huguet, definidas como una visión integrada u holística del suelo, y Albareda, de carácter más analítico, no llegaron a interrelacionar de forma clara hasta la década de los cincuenta, en la que nuevamente se consideraron las teorías de Kubiena. Parece claro que todos los estudios de química y mineralogía del suelo realizados hasta aquel entonces hubieran sido mucho más fructíferos si se hubieran acompañado de la visión geográfica de los suelos que Huguet había ya establecido en años precedentes.

Geológicamente Galicia es un macizo Hercínico constituido por una gran variedad de materiales, más homogénea en la mitad occidental, con predominio de materiales graníticos, débilmente metamórfica en el sector oriental (provincia de Lugo y parte oriental de la de Orense) y muy heterogénea en la parte más septentrional.

En Galicia, la presencia de suelos con propiedades ándicas se encuentra ligada a la existencia de rocas básicas o ultrabásicas, de origen no volcánico, fácilmente alterables. Los conocimientos geológicos actuales sobre las rocas de carácter básico y ultrabásico, están basados principalmente en los trabajos que Parga Pondal realizó entre 1956 y 1966, continuados posteriormente por la escuela de Leiden ([Koning, 1966](#)), quienes las clasificaron en función de sus características mineralógicas y el tipo de asociación que presentan. Entre los grupos establecidos, el más importantes es el grupo del Lopolito, formado por un núcleo central de gabros y noritas rodeado por formaciones metamórficas (anfíbolitas, gneis de biotita principalmente) y en el que los afloramientos principales son Barrañán, Carballo, Monte Castelo, Santiago-Ponte Ulla, Melide-Sobrado y las bandas de Irixoa, Rodeiro, Pontedeume, Xubia y Valdoviño. [Koning \(1966\)](#) diferenció su origen en tres fases de formación:

1. La fase más antigua (precámbrica) constituida principalmente por granulitas y eclogitas y gran parte de las anfíbolitas ordinarias y granatíferas.
2. Una fase intermedia (ante-hercínica) caracterizada por la presencia de las anfíbolitas denominadas como “*amphibolites à flocons*” y por peridotitas débilmente metamorfizadas.
3. La fase más reciente (Hercínico) en la que se produce la intrusión de gabros y dioritas, cuyo conjunto aparece localmente metamorfizado.

La presencia de minerales muy lábiles junto con unas características climáticas adecuadas, elevada humedad relativa (> 80 %) y una temperatura media suave (entre 10,4 y 16,2 °C) (Carballeira y col., 1983; Martínez-Cortizas, 1987 a y b; Martínez-Cortizas y Pérez Alberti, 2000), abundante materia orgánica, buen drenaje y una elevada actividad microbiana, provoca que la cinética de alteración sea más rápida que la de la neoformación de los productos secundarios, que, por otra parte, se encuentra ralentizada por la formación de complejos organometálicos, entre los productos de alteración y los componentes orgánicos del suelo, originando la estabilización de ambos intermediatos (Macías y col., 1978; García-Rodeja y Macías, 1984). Como resultado se produce un proceso de *amorfización* muy intenso que conduce a la destrucción de las estructuras cristalinas y a la formación de coloides de bajo grado de orden (Macías y col., 1978), dando lugar a suelos caracterizados por la presencia de carga variable, una elevada reactividad frente a aniones ( $F^-$ ,  $PO_4^{-3}$ ,  $SO_4^{-2}$ , etc.), baja densidad, con propiedades tixotrópicas, hidrófobos tras ser desecados y con elevados niveles de Al soluble en oxalato amónico. En definitiva, se originan suelos que cumplen todos los requisitos para ser clasificados como Andosoles (García-Rodeja y col., 1987).

Las propiedades ándicas de los suelos de Galicia encuentran su mayor expresión cuando se trata de superficies fuertemente rejuvenecidas por procesos de erosión (Macías y Calvo de Anta, 1992), lo que sucede con mucha frecuencia. Las elevadas precipitaciones, las talas indiscriminadas, el pastoreo excesivo, la puesta en cultivo de zonas forestales y los incendios forestales (Macías y Calvo de Anta, 1992), así como la casi continua sucesión de laderas y valles surcados por una amplia red hidrográfica, dan lugar a la existencia de importantes procesos de rejuvenecimiento de los suelos, tanto en las zonas de mayor pendiente, que son erosionadas, como por la acumulación de materiales en superficie en posiciones de ruptura de pendiente y en las bases de las laderas, lo que conduce a la aparición de líneas de piedras que separan ciclos de formación de suelos (Gutián, 1967; Puga y col., 1978;...).

Existe una amplia bibliografía relacionada con el estudio de los suelos de Galicia con propiedades ándicas. Entre todos los trabajos de investigación elaborados sobre la caracterización de los suelos desarrollados a partir de materiales básicos y ultrabásicos cabe citar los realizados por Macías, en relación con la influencia del material de partida sobre las propiedades de los suelos y sobre la formación y distribución de componentes no cristalinos (Macías y col., 1978, Macías y Gutián, 1980; Macías y col., 1980 a y b, 1981 a y b; 1982; Macías, 1981, 1982; Macías y Calvo de Anta, 1992) y con la elaboración del mapa de suelos de Galicia a escala 1: 50.000 (Calvo de Anta y Macías, 1998), los de Manuel Puga, sobre el Macizo Gabroico de Monte Castelo (Puga, 1976 y 1982; Puga y col., 1978) y los de Eduardo García-Rodeja, sobre los suelos ácidos de Galicia (García-Rodeja y Macías, 1984; García-Rodeja y col., 1984, 1985 y 1987), la caracterización de los componentes no cristalinos (García-Rodeja, 1983; García-Rodeja y col., 1987), el estudio de las fracciones de aluminio por disolución selectiva (García-Rodeja y col., 2004) y la clasificación de Andosoles en materiales no volcánicos (García-Rodeja, 1985 y 1986). Además, García-Rodeja contribuyó en múltiples investigaciones relacionadas con los suelos volcánicos de Europa, todas ellas integrada en *ACTION COST* celebrada en Islandia en el año 2004 (Óskarsson y Arnalds, 2004).

El reciente reconocimiento internacional del importante papel que las variaciones de los stocks de carbono en el suelo juegan en las emisiones/inmisiones de CO<sub>2</sub> a/de la atmósfera ha acrecentado el interés por el estudio de estos suelos, concretamente en la caracterización y cuantificación de las fracciones orgánicas de los mismos. En esta línea, es de gran interés, no sólo profundizar en el conocimiento de los mecanismos de estabilización de la materia orgánica en los suelos con propiedades ándicas – ya iniciado por varios grupos de investigadores, p.e., [Wada y Aomine \(1973\)](#), [Boudot y col. \(1989\)](#), [Zech y col. \(1997\)](#) y [Torn y col. \(1997\)](#), entre otros - con el fin de favorecer el desarrollo de los mismos, sino además, fomentar la protección de estos suelos y evitar que una mala gestión de lugar a que estos suelos de alta capacidad de retención de C se degraden o pierdan cualidades y pasen a actuar como fuente en lugar de sumidero de carbono.

Las perturbaciones que se producen en los ecosistemas terrestres naturales como consecuencia del cambio de uso de suelo (incendios, laboreo, encalado, fertilización, erosión, etc.) afectan de forma contundente a la dinámica del C orgánico de los mismos, produciéndose, generalmente, una disminución de sus contenidos ([Parfitt y col., 1997](#); [Verde y col., 2005](#)), lo que supuso durante las décadas de los 80 y 90 unas emisiones netas de C hacia la atmósfera de 1,7 Gt C año<sup>-1</sup> y 1,6 Gt C año<sup>-1</sup> respectivamente ([Houghton, 1999](#); [Houghton y col., 2000](#)). Además, la materia orgánica del suelo es un elemento fundamental que contribuye a mantener la estructura del suelo y los agregados ([Tisdall y Oades, 1982](#); [Elliot, 1986](#)), un correcto flujo de agua y aire a través del perfil de suelo, la capacidad de retención de agua y reduce el efecto de los procesos erosivos ([Gregorich y col., 1994](#); [Kay, 2000](#)). La estrecha relación entre los contenidos de materia orgánica y las propiedades físicas y químicas del suelo sugiere que una disminución de los contenidos de C orgánico, como consecuencia del cambio de uso de suelo, lleve asociado una merma de las propiedades físicas relacionadas, como el aumento de la densidad aparente y una disminución de la porosidad, infiltración de agua y de la capacidad de almacenamiento de agua ([Franzluebbers, 2002](#); [Wall y Heiskanen, 2003](#); [Celik, 2005](#)).

Por todo ello, la gestión agrícola actual debe de reorientarse de modo que se invierta esta situación en la que los procesos agrícolas y silvícolas funcionen como fuente de C atmosférico. La implantación de nuevas técnicas de gestión agrícola, como el laboreo de conservación, la gestión de residuos de cosechas, la adición de materia orgánica exógena y la utilización de cultivos energéticos, siempre que las condiciones edafoclimáticas y los condicionantes socio-económicos lo permitan, así como el establecimiento de normas de protección de suelos con alta capacidad de retención de C, tales como suelos con propiedades ándicas, puedan contribuir en gran medida al aumento de los contenidos de C y a la conservación de las propiedades físico-químicas del suelo ([Camps Arbestain y col., 2004](#)).

## 2. Objetivos

Tal y como se ha visto anteriormente, existe una amplia bibliografía sobre la caracterización de las propiedades ándicas en suelos de Galicia así como de los componentes característicos de este tipo de suelos. Sin embargo, los estudios referidos a cómo estos componentes y propiedades son modificadas con el cambio de los factores de formación y, sobre todo, del uso son muy escasos, al igual que tampoco existen estudios dirigidos

hacia la cuantificación y distribución de las formas de carbono en suelos ándicos de Galicia, una de las cuestiones más importantes dentro del marco del Protocolo de Kioto. Todo ello justifica el desarrollo del presente trabajo de Tesis Doctoral cuyos objetivos fundamentales son:

- 1.- Cuantificar en qué medida afectan el material de partida, las condiciones climáticas, el tipo de vegetación y el grado y tipo de desarrollo del suelo al desarrollo de las propiedades ándicas.
- 2.- Cuantificar el efecto que el cambio de uso de suelo, de forestal a agrícola, tiene sobre las propiedades ándicas de los suelos desarrollados a partir de rocas básicas de Galicia.
- 3.- Determinar qué factores determinan la pérdida de las propiedades ándicas tras el cambio de uso y cuáles son las propiedades y componentes que se modifican a medida que lo hacen las propiedades ándicas.
- 4.- Cuantificar las pérdidas y ganancias relativas de elementos químicos en suelos desarrollados a partir de litologías similares, rocas básicas fundamentalmente, y bajo diferentes condiciones climáticas y de uso de suelo.
- 5.- Comparar la composición de la materia orgánica de suelos que, si bien están desarrollados a partir de un mismo material de partida, presentan diferencias en cuanto al tipo de uso que se hace de ellos y cuantificar cuales de sus constituyentes son más sensibles a dicho cambio de uso.



## 4. Bibliografía

- Boudot, J.P., Bel Hadj, B.A., Steiman, R., Seigle-Murandi, F. 1989. Biodegradation of synthetic organo-metallic complexes of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios. *Soil Biology and Biochemistry*. 21: 961-966.
- Calvo de Anta, R., Macías, F. 1998. Mapa de Solos de Galicia. Escala 1: 50.000. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia.
- Camps Arbestain, M., Martinez de Arano, I., Mendarte, S., Aizpurúa, A., Pinto, M. 2004. Pautas para inducir una acumulación adicional de carbono orgánico en biomasa forestal y en suelos agrícolas, pascícolas y forestales en la Comunidad Autónoma del País Vasco. *Edafología*. 11(2) : 171-196.
- Carballeira, A., Devesa, C., Retuerto, R., Santillán, E., Uceda, F. 1983. Bioclimatología de Galicia. Fundación Pedro Barrié de la Maza. La Coruña. 361 pp.
- Celik, I., 2005. Land-use effects on organicmatter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Research*. 83: 270-277.
- Elliot, E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 50: 627-33.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil Tillage Research*. 66: 197-205.
- García-Rodeja, E., Macías, F. 1983. Influencia de los componentes no cristalinos en algunas propiedades de los suelos formados sobre rocas graníticas de Galicia. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 6: 237-253.
- García-Rodeja, E., Macías, F. 1984. Caracterización de los suelos ácidos (Podzoles, Andosoles, Suelos Alumínicos) de Galicia. Relación con los procesos edafo-geoquímicos. *I Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. 589-602.
- García-Rodeja, E., Macías, F., Guitián Ojea, F. 1984. Reacción al NaF de los suelos de Galicia. IV. Suelos desarrollados sobre esquistos del Complejo de Órdenes, rocas básicas y metabásicas. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 43: 1311-1337.
- García-Rodeja, E., Macías, F., Guitián Ojea, F. 1985. Reacción al NaF de los suelos de Galicia. V. Relación con el material de partida y los procesos edafogénesis. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 44: 357-368.

- García-Rodeja, E. 1985. Sobre la clasificación de Andosoles y su existencia en materiales no volcánicos de Galicia (NO de España). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 44: 1651-1661.
- García-Rodeja, E., Silva, B., García, C., Macías, F. 1986. Propiedades de los suelos desarrollados sobre las anfibolitas de “Santiago-Ponte Ulla”. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 45: 1271-1298.
- García-Rodeja, E., Silva, B.M., Macías, F. 1987. Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *European Journal of Soil Science*. 38 (4): 573-591.
- García-Rodeja, E., Novoa, J.C., Pontevedra, X., Martínez-Cortizas, A., Buurman, P. 2004. Aluminium fractionation of European volcanic soils by dissolution techniques. *Catena*. 56: 155-183.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, CM., Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 74: 367-385.
- Gutián Ojea, F. 1967. Suelos de la zona húmeda española. I. Tipos principales y sus relaciones genéticas. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 26: 1369-1378.
- Houghton, R.A., 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850 to 1990. *Tellus*. 50B: 298-313.
- Houghton, R.A., Skole, D.L., Nobre, C.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T., Chomentowski, W.H. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*. 403: 301-304.
- Kay, B.D. 2000. Soil structure. In: Sumner, E.M. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton London, New York, Washington, D.C., pp. A229–A264.
- Koning, H. 1966. Les types des roches basiques et ultrabasiqes qu’on rencontre dans la partie occidentale de la Galice (Espagne). *Leid. Geol. Med.* 36: 235-242.
- Macías, F., Puga, M., Gutián Ojea, F. 1978. “Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia”. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 37:187-203.
- Macías, F., Gutián Ojea, F. 1980. La presencia de Gibbsita en los suelos de clima templado: una revisión de los conocimientos actuales (I). *Anales de Edafología y Agrobiología*. 39: 301-341.
- Macías, F., Gutián Rivera, F., García-Rodeja, E., Vidal Romarí, J.R. 1980 a. Componentes no cristalinos y cristalinos (Gibbsita y caolinita) en los productos de neoformación de las rocas graníticas de Galicia. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 1: 51-67.



- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1980 b. El factor material de partida en los suelos de Las Mariñas. 1. Alteración de rocas metabásicas. *Cuadernos del Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. 1: 205-223.
- Macías, F. 1981. Formation of gibbsite in soils and saprolites at temperate humid zones. *Clay Minerals*. 16: 43-52.
- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1981 a. Alteración de los esquistos de Las Mariñas en medios confinados y con humedad alternante. *Acta Científica Compostelana*. 17: 247-263.
- Macías, F., García, C., Giménez de Azcarate, M., Villar Celorio, M.C. 1981 b. El factor del material de partida en los suelos de Las Mariñas 2. Alteración de los esquistos en medios bien drenados. *Acta Científica Compostelana*. 17: 265-292.
- Macías, F., Calvo de Anta, R., García, C., García-Rodeja, E., Silva, B. 1982. El material original: su formación e influencia en las propiedades de los suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 41: 1747-1768.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. 1992. Suelos de la provincia de La Coruña (Mapa escala 1: 200.000. Diputación Provincial de La Coruña (Eds.). 85 pp.
- Marti Henneberg, J.L. 1984. Emilio Huguet del Villar (1871 – 1951): Cincuenta años de la lucha por la ciencia. Universidad de Barcelona.
- Martínez-Cortizas, A. 1987 a. Clima y clima del suelo de la provincia de La Coruña. En: Suelos cultivables de la provincia de La Coruña. Excma. Diputación Provincial de LA Coruña. Mem. mec.
- Martínez-Cortizas, A. 1987 b. Zonas agroecológicas de Galicia: Zonas climáticas FAO. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 46: 521-538.
- Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. 2000. Atlas Bioclimático de Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente. 203 pp.
- Óskarsson, H., Arnalds, O. (Eds.). 2004. Volcanic Soils Resources in Europe. COST Action 622 final meeting. Abstracts. Rala Report no. 214. Agricultural Research Institute. Reykjavík. Iceland. 129 pp.
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S., Shepherd, T.G. 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*. 75: 1-12.
- Puga, M. 1976. Estudio de una catena sobre gabros. Trabajo de Licenciatura. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.

- Puga, M., Macías, F., Guitián, F. 1978. Pedological and Geochemical cycles in catena of Galicia (NW Spain). *Catena*. 5: 375-387.
- Puga, M. 1982. Estudio de los suelos sobre gabros. Tesis Doctoral. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*. 389: 170-173.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science*. 33: 141-163.
- Verde, J.R., Camps-Arbestain, M., Macías, F. 2005. Expression of andic properties in soils from Galicia (NW Spain) under forest and agricultural use. *European Journal of Soil Science*. 56: 53-63.
- Wada, K., Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic material during the Quaternary. *Soil Science*. 116: 170-177.
- Wall, A., Heiskanen, J. 2003. Water-retention characteristics and related physical properties of soil on afforested agricultural land in Finland. *Forestry and Ecological Management*. 186: 21-32.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A., Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79: 117-161.

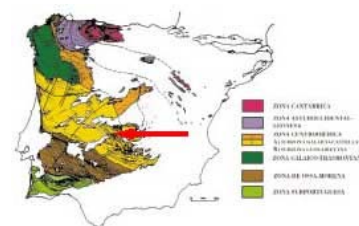
## Capítulo 3

---

*Variabilidad de las Propiedades Físicas, Químicas y  
Mineralógicas  
en Suelos desarrollados sobre Materiales Básicos y  
Ultrabásicos  
en el Noroeste Peninsular.  
Relación con la Clasificación de Andosoles*



# Capítulo 3



Macizo Hespérico

## Variabilidad de las Propiedades Físicas, Químicas y Mineralógicas en Suelos desarrollados sobre materiales Básicos y Ultrabásicos en el Noroeste Peninsular. Relación con la Clasificación de Andosoles.

---

### 1. Resumen

Se han seleccionado 28 perfiles (20 en Galicia y 8 en el NE de Portugal) de suelos desarrollados sobre diferentes tipos de materiales de partida de carácter básico y ultrabásico (gabros, anfibolitas, granulitas, serpentinas, esquistos y gneis) para realizar un estudio sobre la variabilidad de las propiedades ándicas en función de la climatología, uso y vegetación. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas en relación con las distintas formas de Al, C y composición mineralógica entre los diversos suelos. De esta forma, los suelos desarrollados sobre gabros, anfibolitas, granulitas e incluso gneis, presentan mayores cantidades de formas de Al reactivas, ligadas fundamentalmente a complejos Al-humus estables (relaciones  $Al_p/Al_o$  próximas a 1) y a minerales de bajo grado de orden (alofano), patentes en el análisis mineralógico de la fracción arcilla, en comparación con los restantes grupos de suelos (serpentinas y esquistos). Además estos suelos presentan mayores cantidades de C orgánico constituido principalmente por formas de C no oxidable y difícilmente oxidables, lo que se debe a la estabilización de la materia orgánica del suelo por formas de Al reactivas, mediante la formación de complejos Al-humus, y por la adsorción de ésta sobre la superficie de minerales de bajo grado de orden. En contraposición, suelos sobre serpentinas y esquistos, que presentan cantidades de C orgánico significativamente inferiores, y dada la ausencia de minerales de bajo grado de orden y de complejos Al-humus, las formas de C más estables se encuentran ligadas principalmente a la fracción mineral del suelo, generalmente a la fracción limo.

Estas diferencias se deben principalmente a la existencia de regímenes ombrotérmicos bien diferenciados, de carácter húmedo o muy húmedo en los perfiles gallegos y de carácter seco o muy seco en Portugal. Las altas

---

precipitaciones y las temperaturas suaves durante gran parte del año en suelos de Galicia favorecen, por un lado, la rápida meteorización de los materiales de partida, facilitando la liberación de formas reactivas de Al y la formación de complejos Al-humus y minerales de bajo grado de orden, y, por otro, una buena producción primaria, fuente del C orgánico. En los suelos de Portugal, la ausencia de precipitaciones dificulta tanto los procesos de meteorización del material de partida como el desarrollo de la vegetación. Un caso especial son los suelos sobre serpentinas de Galicia en los que, aunque presentan un régimen ombrotérmico que favorece los procesos de meteorización y la producción primaria, la carencia de Al en el material de partida junto con el exceso de  $Mg^{+2}$  en el complejo de cambio y la posible toxicidad por metales pesados característico de este tipo de suelos, que dificultan el desarrollo de la vegetación, conducen tanto a la escasez de C orgánico como de complejos A-humus.

Todo ello conduce a que los suelos desarrollados sobre gabros y anfibolitas cumplan todos los criterios para propiedades ándicas y pueden ser clasificados como Andosoles, salvo el perfil de Goias I que por cuestiones de espesor solamente puede ser clasificado como Leptosol ándico. Los suelos sobre granulitas y gneis, aunque muchos de ellos cumplen alguno de los criterios para propiedades ándicas, se engloban dentro del Orden Umbrisol y los suelos sobre serpentinas y esquistos permanecen dentro del Orden Leptosol dada la naturaleza esquelética de los mismos.

## 1. Introducción

Los Andosoles son un tipo de suelos ampliamente estudiados en todo el mundo a pesar de que solamente representan entre el 0,76 y el 0,84% de la superficie terrestre total (Leamy y col., 1980; Leamy, 1984). Este gran interés por su estudio radica en el hecho de que son una gran fuente de recursos naturales para los habitantes de las regiones que ocupan y por estar desarrollados sobre materiales de partida que ofrecen una escasa resistencia a los procesos de meteorización en comparación con otros tipos de materiales (Shoji, 1986).

Los procesos de meteorización de estos materiales fácilmente alterables dan lugar a la formación de elevadas cantidades de minerales de bajo grado de orden como alofana, imogolita, ferrihidrita y sílice amorfo (Shoji y col., 1993), originados como resultado de la sobresaturación de la solución del suelo en Si, Fe y Al (Moustakas y Georgoulas, 2005) y cuya proporción depende en gran medida de las condiciones climáticas, de las características específicas de cada material de partida y del estado de meteorización (Shoji, 1986). La formación de minerales de bajo grado de cristalinidad, junto con la capacidad de acumulación de carbono orgánico que presentan los suelos con propiedades ándicas, se da preferentemente sobre materiales de partida de origen volcánico (Shoji y col., 1996), aunque también se dan propiedades similares en suelos ricos en materiales fácilmente meteorizables (anfíbolita, diorita, gabro y granulita) (García-Rodeja y col., 1987; Aran y col., 1998) fuertemente meteorizados, en condiciones de buen drenaje, desarrollados sobre materiales no volcánicos y sujetos a diversas condiciones climáticas (García-Rodeja y col., 1987; Hunter y col., 1987; Hewitt y Witty, 1998; Bäumlér y Zech, 1994; Alexander y col., 1993; Aran y col., 1998; Caner y col., 2000). Incluso, rocas con un elevado contenido en sílice, como esquistos biotíticos y gneis, pueden desarrollar propiedades ándicas (García-Rodeja y col., 1987), siempre y cuando las condiciones de formación de suelo hagan prevalecer los procesos de meteorización de los minerales primarios sobre la neoformación de minerales cristalinos, en condiciones de buen drenaje. En estas condiciones, se produce la pérdida de Si y la liberación de grandes cantidades de Al que favorece la formación de complejos Al-humus en asociación con minerales secundarios de bajo grado de orden (García-Rodeja y col., 1987; Macías y Calvo de Anta, 1992).

Además de la gran cantidad de minerales de bajo grado de orden, como integrantes fundamentales, los Andosoles presentan una serie de características que los hacen muy especiales, como su gran capacidad de retención de agua, presencia de un horizonte A superficial muy oscuro, elevada capacidad de retención de nutrientes, etc. (Nanzio y col., 1993; Kimble y col., 2000). De entre todas ellas, quizás una de las propiedades más importantes es la gran capacidad de acumular carbono orgánico (5-20 % en peso), principalmente en forma de ácidos húmicos estables, que se estima en 25,4 kg m<sup>-2</sup> en los primeros 100 cm (Batjes, 1996).

La estabilización del carbono orgánico, llevada a cabo mediante fuerzas de atracción electrostática y procesos de absorción y/o adsorción, así como la consiguiente formación de una microestructura granular que les confiere protección frente a los procesos oxidativos y a la acción microbiana (Buurman y col., 2007; González-Pérez y col., 2007), favorece la acumulación de materia orgánica y explica su elevado tiempo de residencia

---

(Boudot y col., 1989; Zech y col., 1997), que en algunas ocasiones puede ser de entre 5.000 y los 30.000 años (Wada y Aomine, 1973; Torn y col., 1997).

Aunque se conoce relativamente poco a cerca de los mecanismos relacionados con la dinámica de la estabilización de los componentes orgánicos del suelo, se puede decir que los Andosoles presentan un gran potencial para el secuestro de carbono (Lal y col., 1998), lo que hace de este tipo de suelos un compartimento muy importante como sumidero de carbono. Estudios recientes, realizados mediante Pirólisis GC/MS, muestran que en suelos ándicos la cantidad de material pirolizable es mucho mayor que en suelos no ándicos (Cambisol sódico) (González-Pérez y col., 2007), caracterizados, además, por la elevada cantidad de componentes alquílicos. Este mayor secuestro de formas alquílicas contradice las hipótesis clásicas de concentración de estructuras aromáticas, aunque ésta última podría ser una alternativa válida para suelos ándicos que han sufrido episodios de fuego en el pasado (Shindo y col., 1986 a y b; Golchin y col., 1997).

Por otra parte, diversas investigaciones han puesto de manifiesto que cambios en el tipo de uso y manejo de suelo, tienen un efecto negativo sobre las propiedades ándicas (Parfitt y col., 1997; Verde y col., 2005), causando una destrucción de los complejos Al-humus y un descenso significativo, de hasta el 50 %, de la cantidad de carbono total del suelo (Schlesinger, 1985; Post y Mann, 1990; Davidson y Ackerman, 1993; Verde y col., 2005). Este proceso de pérdida de materia orgánica, fundamentalmente por procesos oxidativos, conduce, en un periodo relativamente corto de tiempo, a que los suelos con propiedades ándicas pasen a formar parte de los compartimentos que actúan como fuentes de carbono a la atmósfera (Duiker y Lal, 1999), perdiendo, además, muchas de las propiedades que los caracterizan y los hacen tan importantes desde el punto de vista agronómico y ambiental.

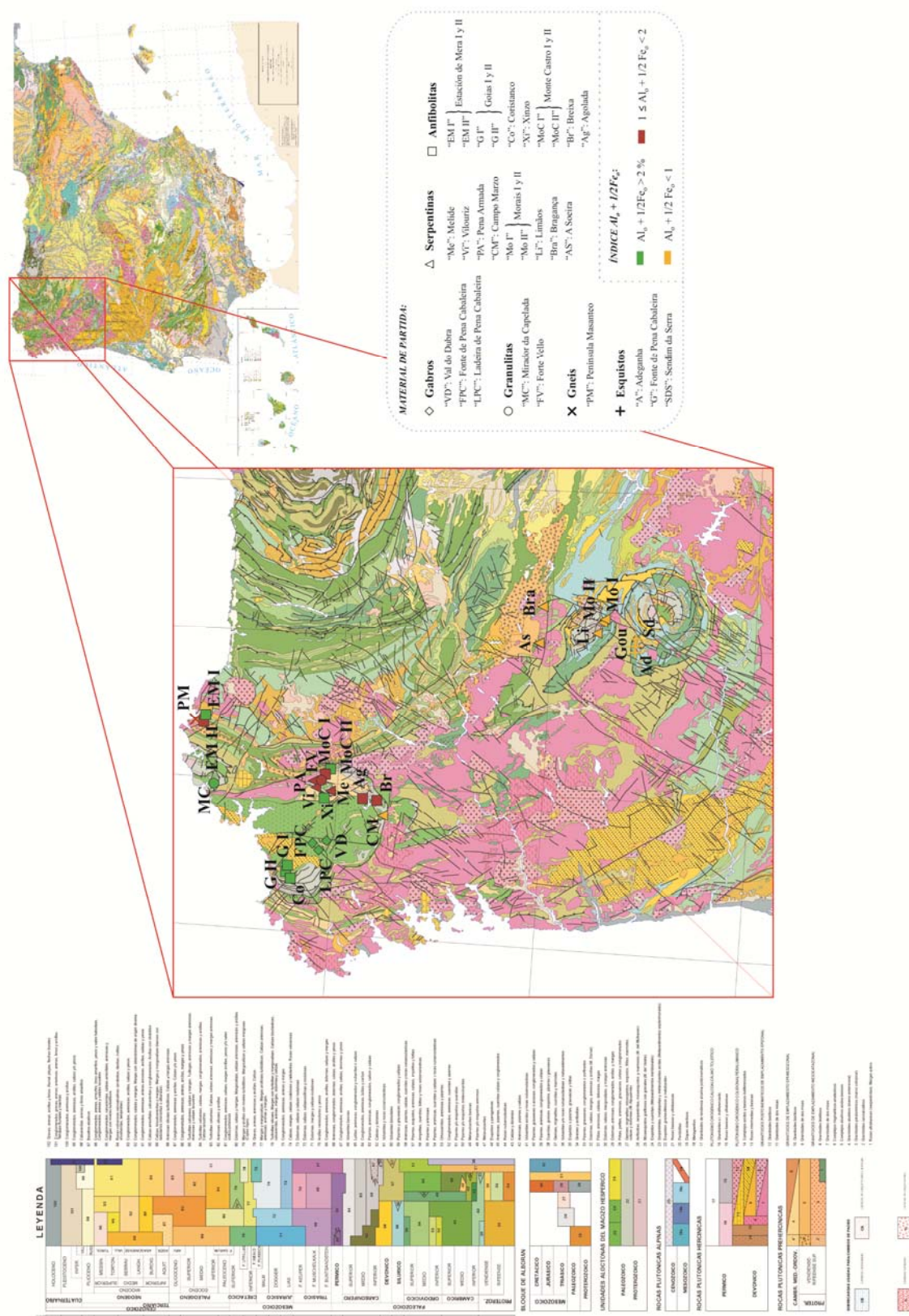
Por todo lo ello, los objetivos de nuestro estudio son, por un lado, caracterizar las propiedades físicas y químicas de una serie de perfiles de suelo desarrollados sobre diferentes sustratos de carácter básico del noroeste de la Península Ibérica y, por otro, determinar en qué medida afectan las características particulares del material de partida, vegetación y la climatología de cada área de estudio a la distribución de las propiedades ándicas, a la estabilidad de las formas de carbono de los suelos y a su clasificación como Andosoles.

## 2. Material y Métodos

### 2.1. Descripción del Área de Estudio

Para la realización del presente estudio se eligieron 28 suelos — con un total de 70 horizontes — de los cuales 17 pertenecen a la provincia de A Coruña, 3 a la provincia de Pontevedra (Mapa.1) y 8 a la parte nororiental de Portugal (zona de Bragança hasta el río Duero). Los puntos de muestreo se eligieron en función del material de partida, que en todos los casos se corresponden con materiales básicos y utrabásicos, tales como granulitas, serpentinas, anfíbolitas y gabros (Mapa 1) con vegetación de monte bajo y arbolado, tratando de recoger la variabilidad de condiciones climáticas de Galicia y el norte de Portugal. Información más detallada sobre los suelos estudiados se presenta en el epígrafe 3.1.





**Mapa 1.-** Ubicación de los perfiles edáficos estudiados en el mapa geológico de la Península Ibérica (I.G.M.E., 1994).

### 2.1.1 Geología.

#### 2.1.1.1 Provincia de La Coruña

##### - Perfiles del Complejo de Cabo Ortegal:

Los perfiles más septentrionales, ubicados en la “*Serra da Capelada*”, se encuentran sobre tres litologías distintas, todas ellas incluidas en el Complejo de Cabo Ortegal. En primer lugar, destacamos las **anfibolitas** de Mera (IGME Hoja 7, 1978), las cuales se encuentran como intercalaciones lenticulares, al igual que eclogitas retrógradas y granulitas, en contacto con gneises de anfíbol y granate, o bien de forma mecánica con los gneises de Cariño. Se caracterizan por ser rocas de color verde oscuro, constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, de marcada esquistosidad que suelen tener un estrecho bandeo de segregaciones plagioclaso-anfibolíticas con la presencia ocasional de granate. En segundo lugar, **los gneises**, en el que se encuentra el perfil de Península de Masanteo (IGME Hoja 1, 1978), de edad precámbrica-cámbrica, afloran, junto con eclogitas, en una banda con dirección NNE-SSO entre una banda continua de eclogitas (al Oeste) y una discontinua (al Este). Dentro de estos gneises aparecen generalmente otras rocas básicas, como anfibolitas con granate o cuarzoanfibolitas. En tercer y último lugar, el perfil de Mirador da Capelada (IGME Hoja 1, 1978) se encuentra ubicado sobre **rocas metabásicas en facies granulita**. Se caracterizan principalmente por estar constituidas por granate, anfíbol, piroxeno, plagioclasa y cuarzo, muy variables en proporción. Como minerales accesorios podemos encontrar epidota, rutilo, circón y biotita.

##### - Perfiles del Complejo de Órdenes:

Dentro de este grupo se encuentran los perfiles de Goias I y II y Coristanco (IGME Hoja 44, 1978). Se corresponden con **rocas metabásicas en facies de anfibolita** que se presentan integradas en el arco que bordea los esquistos de Órdenes y el Macizo Gabroico de Monte Castelo, aunque algunos de los afloramientos pueden aparecer como inclusiones dentro de este último. Se caracterizan por presentar en su composición anfíbol, plagioclasa y, en algunos casos, clinopiroxeno. Como minerales secundarios los más frecuentes son el cuarzo, esfena, opacos, clinozoisita, epidota y rutilo, aunque en algunas ocasiones pueden aparecer clorita y carbonatos.

Cabría la posibilidad de incluir este grupo dentro del cuerpo intrusivo del gabro de Monte Castelo, correspondiendo a su parte más basal deformada por su proximidad al cabalgamiento, aunque de momento se consideran como dos formaciones claramente diferenciadas.

##### - Perfiles del Macizo Gabroico de Monte Castelo:

El **Macizo Gabroico** de Monte Castelo, en el que se encuentran los perfiles de Fonte de Pena Cabaleira, Ladeira de Pena Cabaleira y Val do Dubra (IGME Hoja 69, 1978), constituye el afloramiento de gabros más extenso de Galicia que fue incluido en el grupo de Rocas Básicas del Lopolito por Parga Pondal (1966). Se encuentra ubicado entre anfibolitas (parte occidental) y por esquistos de Órdenes (parte Sur oriental), y en su composición consta de clino- y orto-piroxenos, plagioclasas, como minerales primarios, y de olivino, hornblenda parda e ilmenita, pirrotina y grafito como minerales secundarios.

*- Perfiles del Complejo de Rocas de Melide:*

Los perfiles recogidos en las inmediaciones de Melide (Melide, Xinzo, Forte Vello, Vilouriz, Pena Armada y Monte Castro I y II) forman parte del Complejo de Rocas de Melide, dentro del grupo de **Rocas Ultrabásicas Serpentinizadas** (IGME Hoja 96, 1978), uno de los grupos en lo que se divide el Dominio de la Serie de Órdenes. Dentro del Complejo de Rocas de Melide se engloban una serie de rocas básicas, tipo peridotita y/o serpentina (perfiles de Melide, Vilouriz y Pena Armada) y anfibolita (perfiles de Xinzo, Monte Castro I y II y Forte Vello), junto con pequeños enclaves de metasedimentos, que aparecen entre los ortogneis y los granitos del Macizo de Chantada-Taboada. Las peridotitas dan lugar, generalmente, a zonas de relieve muy acusado y a suelos de escasa potencia que, en la mayoría de casos, sólo pueden dedicarse al pastoreo.

**2.1.1.2 Provincia de Pontevedra:**

*- Perfiles de la Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo:*

En este enclave litológico, Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo, se encuentra el perfil de Campo Marzo (IGME Hoja 121, 1978). Se trata de una zona en la que abundan los enclaves de **serpentinitas** transformadas en gran parte a rocas tremolíticas. Se caracterizan por ser rocas de color negro a verdosas que se presentan generalmente en forma masiva, aunque lo pueden hacer en forma foliada. La composición mineralógica de este tipo de roca no varía mucho con respecto a otro tipo de serpentinitas. Como minerales primarios encontramos clorita, opacos y serpentina, en su gran mayoría de tipo hojoso, junto con relictos de olivino y/o piroxeno. Como minerales accesorios se presentan espinelas y carbonatos. En general este tipo de formaciones pueden ir acompañadas de rocas compuestas básicamente por talco, en facies foliadas (talcoesquistos) o facies masivas (esteatitas).

*- Perfiles de la Unidad de Lalín:*

El perfil de Breixa (IGME Hoja 121, 1978) se encuentra situado en las **anfibolitas** pertenecientes a la Unidad de Lalín que se presentan como cuerpo casi masivo con contornos irregulares al Norte de Silleda. Se caracterizan por presentar como mineralogía fundamental anfíbol y plagioclasa, aunque pueden contener en proporciones variables cuarzo, biotita, feldespato potásico y moscovita. Como minerales de segundo orden pueden encontrarse clinozoisita, esfena, opacos, apatito y sericita, además de clorita y leucoxeno como productos secundarios.

*- Perfiles del Complejo de Rocas de Melide:*

Al igual que los perfiles recogidos en las inmediaciones de Melide (Melide, Xinzo, Forte Vello, Vilouriz, Pena Armada y Monte Castro I y II), el perfil de Agolada (IGME Hoja 122, 1978) forma parte del Complejo de Rocas de Melide, dentro del grupo de las **Anfibolitas**. Estas anfibolitas se encuentran frecuentemente retrogradadas a minerales de bajo grado como clorita, mica incolora, zoisita, clinozoisita, albita, uralita y en algún caso zeolita. Como minerales accesorios podemos encontrar apatito, opacos, rutilo y esfena, pudiendo, además, hallar granos de clinopiroxeno y granates relictos de composición almandínica blindados en anfíbol.

---

### 2.1.1.3 Zona de Bragança (Portugal)

#### - Perfiles de la Formación de Desejosa:

La *Formación de Desejosa* pertenece a la fracción alóctona del Grupo del Duero, dentro de los denominados Metasedimentos del Paleozoico, ubicada en la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico (Julivert y col., 1974). A esta formación pertenecen los perfiles de Adeganha y Gouveia (SGP Hoja 11C, 1989) y se caracterizan por la presencia de **esquistos**, frecuentemente calcosilicatados, de coloración verde cenicienta entre los que se intercalan, frecuentemente, bandas de metegrauvacas, que le proporcionan a la roca un aspecto listado muy característico.

#### - Perfiles de la Formación Cuarcítica:

La *Formación Cuarcítica*, a la que pertenece el perfil de Sendim da Serra (IGM Hoja 11B, 2000), forma parte, al igual que la *Formación de Desejosa*, de la fracción alóctona del Grupo del Duero. Se corresponde con una zona de **Esquistos Intermedios** con intercalaciones de metagrés y, en algunos casos, con nódulos de andalucita. Los Esquistos Intermedios se caracterizan por alternancias centimétricas y decimétricas de esquistos políticos y esquistos psamíticos acompañados de cuarcitas en determinadas ocasiones.

#### - Perfiles del Complejo Alóctono Superior:

Los perfiles de Morais I y II se encuentran incluidos dentro de la zona peridotítica del *Complejo Alóctono Superior* (IGM Hoja 7D, 2000). Se caracterizan por la presencia de **blastomilonitos ultramáficos** cuya composición mineralógica es olivino fosterítico y hornblenda junto con cantidades menores de hipersteno, espinelas y granates, dispersos en la matriz de alteración de la serpentina, aunque también pueden aparecer antigorita y crisotilo cuando la meteorización es muy intensa.

#### - Perfiles de la Unidad de Morais-Talhinhas:

Dentro del grupo de las **Peridotitas** pertenecientes al *Macizo de Morais*, incluido en la *Unidad de Morais-Talhinhas* (IGM Hoja 7D, 2000) se encuentra ubicado el perfil de Limãos. En la composición de estas serpentinas se identifican reliquias de olivino y ortopiroxeno junto con magnetita y cromita resultantes de la destrucción del olivino. Como minerales accesorios se encuentran presentes antigorita, pseudomorfos de piroxeno, anfíbol, clorita, carbonatos y talco.

#### - Perfiles del Macizo de Bragança:

Al igual que el *Macizo de Morais*, el *Macizo de Bragança* forma parte del *Complejo Alóctono Superior*. Los perfiles de Bragança (IGM Hoja 7B, 2000) y A Soeira (IGM Hoja 3D, 2000), se encuentran dentro del grupo de las **Metaperidotitas** presentes en éste último y se caracterizan por la presencia de dunitas fuertemente serpentinizadas junto con cantidades más o menos elevadas de olivino, hipersteno, diópsido y espinela cromitífera.

### 2.1.2 Clima.

Las muestras de Galicia se hallan distribuidas en cuatro regiones bien diferenciadas y con climatologías bien separadas a medida que nos dirigimos hacia el interior de la Comunidad Autónoma:

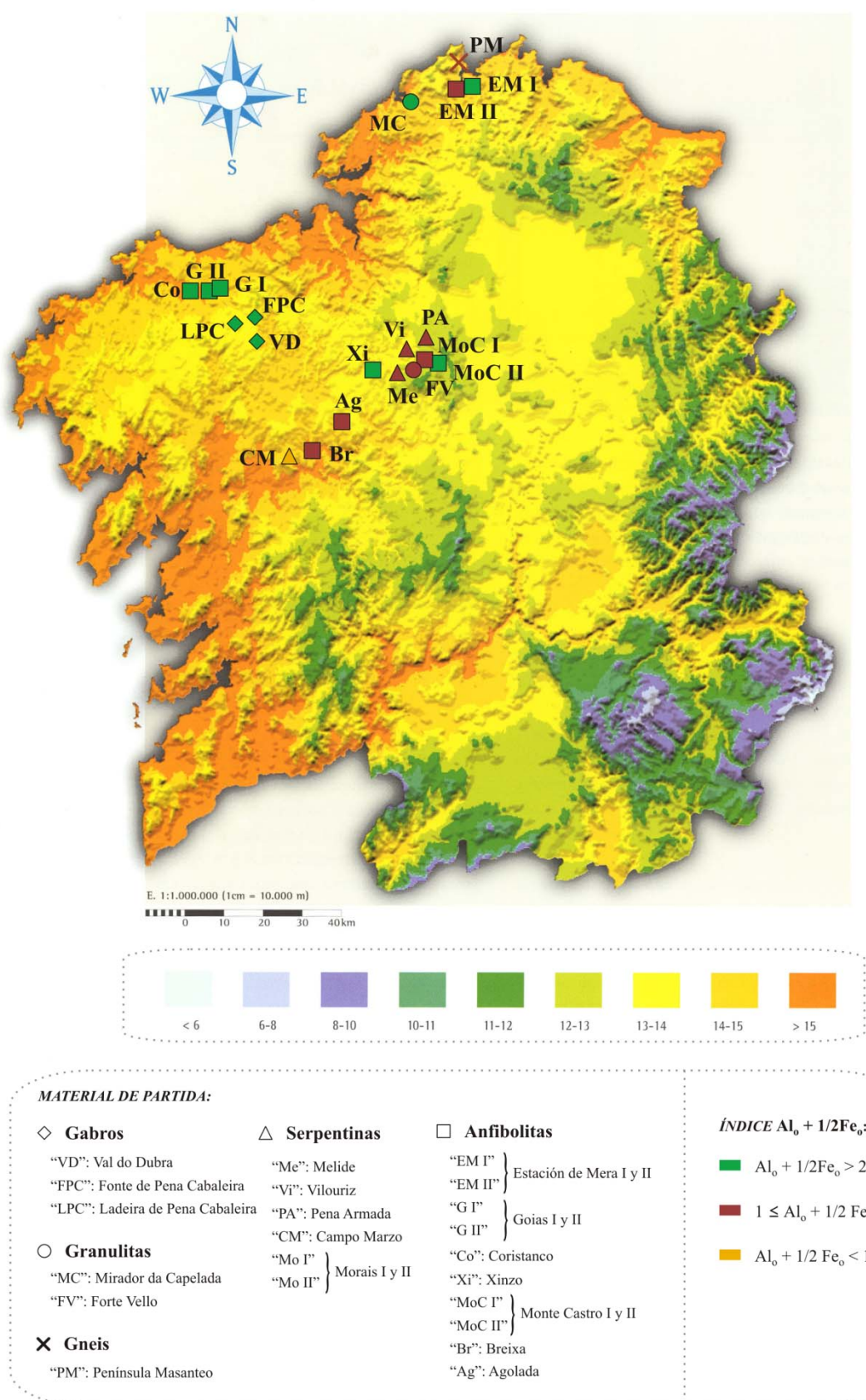
i) En la zona **más septentrional** de la provincia de A Coruña se localizan cuatro de los perfiles estudiados, dos en Mera, Península de Masanteo y Mirador de la Capelada. Todas ellas se encuentran muy influenciadas por el medio marino de forma que presentan unas temperaturas relativamente suaves durante todo el año. La temperatura media anual es de 14-15 °C en las áreas de Península de Masanteo y Mera y de 13-14 °C en Mirador de la Capelada (Mapa 2), oscilando entre los 8-10 °C, en el mes más frío (enero) y más de 20 °C en el mes más cálido (agosto), en el primer caso, y entre los 6-8 °C y los 18-20 °C en el segundo. Por otra parte, la precipitación media acumulada oscila entre los 800-1000 mm en las zonas más bajas y cercanas al mar (Mera y Península de Masanteo) y entre los 1000-1200 mm en las zonas más elevadas (Mirador de la Capelada) (Mapa 3). Los rangos de temperatura y precipitación nos conduce en el primer caso a un régimen ombrotérmico de carácter cálido-seco y en el segundo a uno de carácter templado-subhúmedo (Mapa 4).

ii) En la parte **Noroccidental** la provincia de A Coruña, en la que se localizan los perfiles de Goias, I y II, Coristanco, Ladera de Pena Cabaleira, Fonte de Pena Cabaleira y Val do Dubra, las temperaturas medias anuales varían a medida que nos adentramos en la Comunidad Autónoma. De esta forma, en la zona correspondiente a los perfiles más cercanos a la línea de costa (Goias I y II y Coristanco) las temperaturas medias anuales oscilan entre los 14-15 °C de Goias I y II y los más de 15 °C existentes en Coristanco (Mapa 2), con temperaturas de 8-10 °C en enero y de más de 20 en agosto. A medida que nos acercamos al macizo gabraico de “Monte Castelo”, donde se encuentran los perfiles de Ladeira de Pena Cabaleira y Fonte de Pena Cabaleira y Val do Dudra, la temperatura media anual desciende hasta los 13-14 °C (Mapa 2), variando entre los 17.6 °C para el mes más cálido (agosto) y los 6.4 °C para el mes más frío (enero). La precipitación media acumulada varía entre los 1200-1400 mm desde la línea de costa (Goias I y II y Coristanco) hasta los 1600-1800 mm en zonas del interior (macizo gabraico de “Monte Castelo”) (Mapa 3). Con ello tenemos que el régimen ombrotérmico varía de cálido-húmedo, para los perfiles más septentrionales de la zona, a templado-muy húmedo (Mapa 4) en los más meridionales.

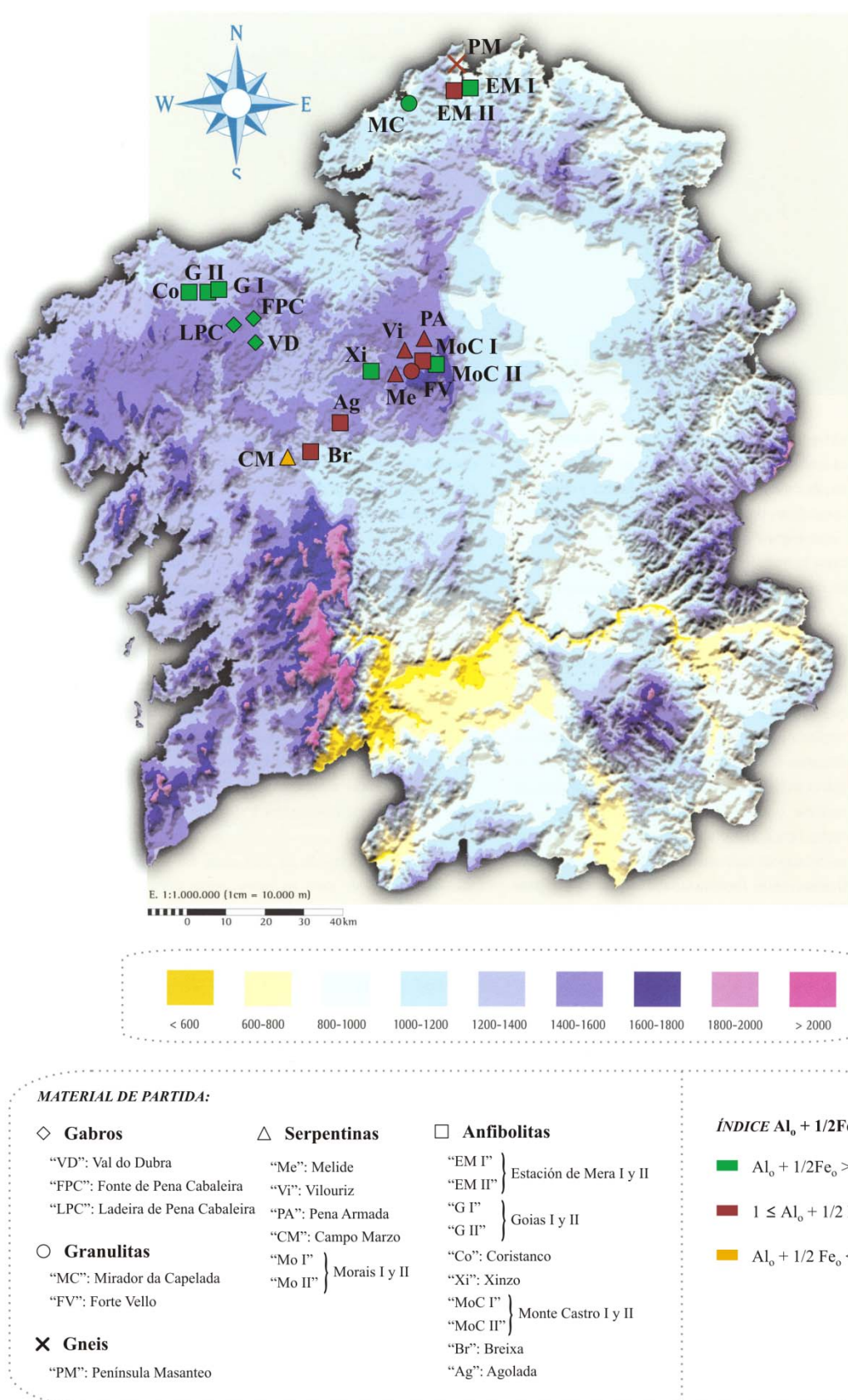
iii) En la parte **Suroriental** de la provincia de A Coruña, se encuentran los perfiles pertenecientes al Complejo de las Rocas Básicas de Melide (Melide, Xinzo, Forte Vello, Vilouriz, Pena Armada y Monte Castro I y II). En esta zona las temperaturas medias anuales oscilan entre los 11-12 °C, correspondientes a los perfiles que se encuentran en una posición fisiográfica inferior (Melide, Xinzo y Forte Vello), y los 10-11 °C de los que ocupan una posición más elevada (Mapa 2). Las temperaturas medias para el mes más frío (enero) oscilan entre 2-4 °C en posiciones elevadas, y los 4-6 °C en posiciones bajas, mientras que para el mes más cálido (agosto) éstas se encuentran entre los 16-18 °C en las posiciones de ladera elevadas, y los 18-20 °C en las posiciones inferiores, respectivamente. Las precipitación media acumulada varía entre los 1400 y los 1800 mm dando lugar a un régimen ombrotérmico de carácter fresco-muy húmedo (Mapa 4).

---



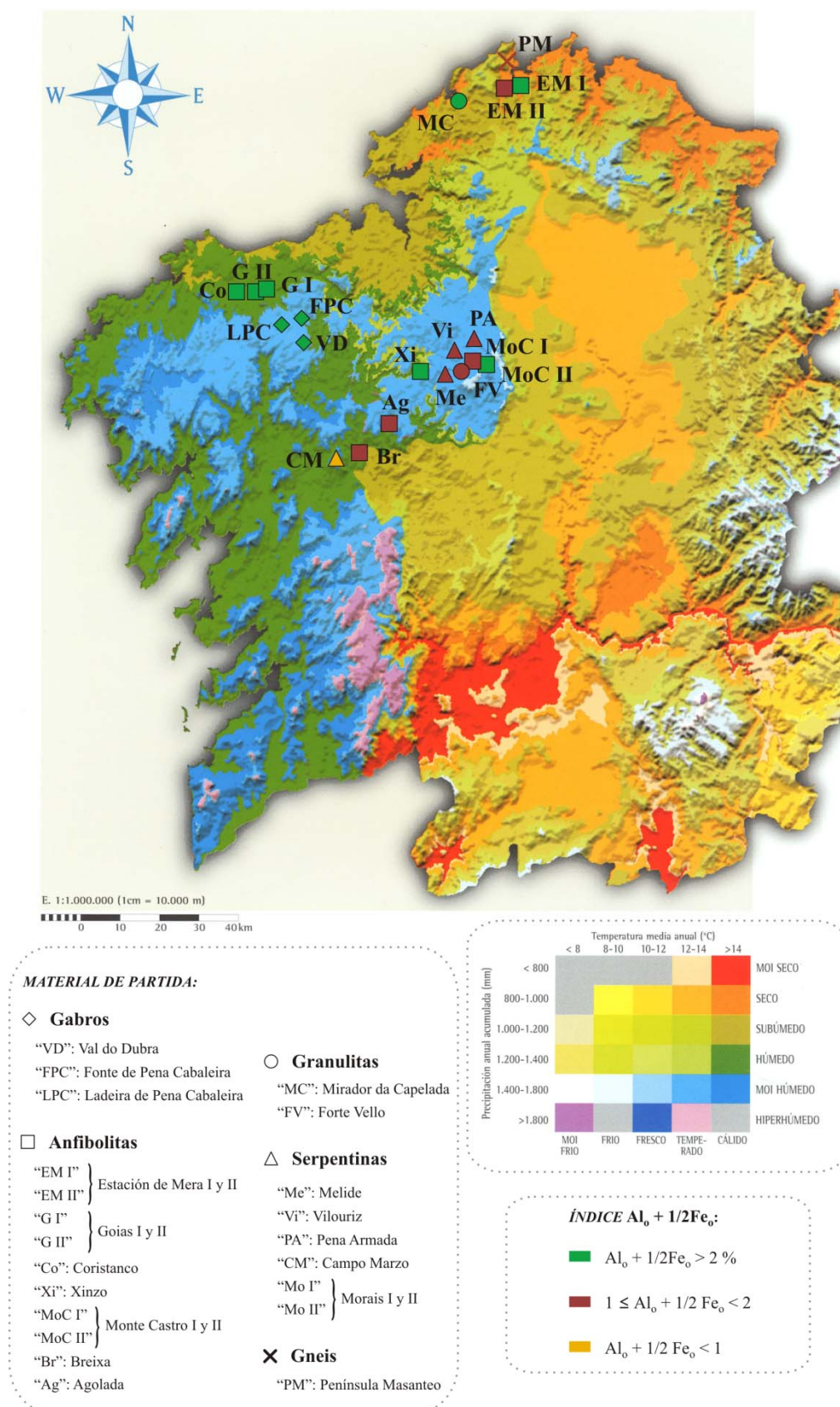


Mapa 2. Ubicación de los perfiles de suelos estudiados en el Mapa de Temperatura anual media del Atlas Climático de Galicia (Martínez Cortizas y col., 1999).



Mapa 3. Ubicación de los perfiles de suelos estudiados en el Mapa de Precipitación anual media del Atlas Climático de Galicia (Martínez Cortizas y col., 1999).





Mapa 4. Ubicación de los perfiles de suelos estudiados en el Mapa de Régimen ombrotérmico del Atlas Climático de Galicia (Martínez Cortizas y col., 1999).



iv) Por último, en la parte *Nororiental* de la provincia de Pontevedra, en la que se ubican los perfiles de Campo Marzo, Breixa y Agolada, las temperaturas medias anuales varían entre los 14-15 °C, en los dos primeros casos, y los 13-14 °C, caso de Agolada (Mapa 2). Las temperaturas medias para el mes más frío (enero) se encuentran entre los 8-10° C (Campo Marzo y Breixa) y los 6-8 °C (Agolada). Por otra parte, las temperaturas medias para el mes más cálido (agosto) varían de más de 20 °C (Campo Marzo y Breixa) y entre 18-20 °C (Agolada). Las precipitaciones medias acumuladas varían entre 1400 y 1800mm (Mapa 3) dando lugar, junto con los rangos de temperatura expuestos, un régimen ombrotérmico de carácter cálido-muy húmedo (Mapa 4).

En todos los suelos de Galicia el régimen de temperatura es “mésico” y el de humedad “údico”, si bien los suelos de muy poco espesor (Leptosoles) pueden tener condiciones de “transición údico-xérico” o incluso “xéricas”.

Según [Agroconsultores e Coba \(1991\)](#) los perfiles de ubicados en Portugal pueden englobarse en cuatro grandes grupos:

- a) En el grupo denominado **Q5** se encuentran incluidos los perfiles de Adeganha y Gouveia. Ambos perfiles se localizan en la zona más meridional de la comarca de Bragança y se integran en la denominada “*Terra Quente Transmontana*”, que tiene como características principales la existencia de inviernos suaves (con heladas desde finales de noviembre a principios de marzo), temperatura media anual superior a 14 °C y una precipitación media anual de 600 mm. Las elevadas temperaturas que se alcanzan durante periodos largos de tiempo a lo largo del año (superiores a los 30 °C) junto con las escasas precipitaciones dan lugar a un régimen ombrotérmico de tipo templado-muy seco.
- b) En el grupo **F3** se engloban los perfiles de Sendim da Serra y Bragança, ubicados en la parte meridional y septentrional de la comarca de Bragança. En este caso, ambos perfiles se integran en la denominada “*Terra Fria de Planalto*”, situada a altitudes de entre 600-700 y 900-1000 m. Se caracteriza por presentar inviernos fríos y prolongados, con heladas entre octubre y mayo, veranos cortos y cálidos, una temperatura anual media superior a 10 °C e inferior o igual a 12.5 °C y una precipitación media anual de 800-1000 mm, lo que conduce a un régimen ombrotérmico templado-seco.
- c) Los perfiles de Morais I y II y Limãos, ubicados en la zona centro de la comarca de Bragança, presentan un clima de tipo **T3** y se integran dentro de la denominada “*Terra de Transição*”, situada a altitudes entre 400-500 y 600-700 m. Presenta características intermedias entre la “*Terra Fria de Planalto*” y la “*Terra Quente*”. Se caracteriza por la presencia de heladas desde finales de octubre a mayo, una temperatura media anual superior a 12.5 °C e inferior o igual a 14 °C y una precipitación anual media entre 800 y 1000 mm, lo que genera la existencia de régimen ombrotérmico de tipo templado-seco.
- d) Por último, el perfil de A Soeira, localizado en la parte Noroccidental de la comarca de Bragança, se incluye dentro del grupo **F2** integrado en la denominada “*Terra Fria de Planalto*”. Las características climáticas para esta zona son las mismas que las descritas para el grupo F3, al que pertenecen Sendim da

Serra y Bragança, con la única salvedad en cuanto a la precipitación media anual que en este caso varía entre los 1000 y los 1200 mm, lo que conduce a un régimen ombrotérmico templado-subhúmedo.

En los suelos de Portugal seleccionados el régimen de temperatura es “mésico”, pudiendo estar en el límite con el “térmico” en la zona de la *Terra Quente*, pero el de humedad es de tipo “xérico”, con un importante componente de carácter mediterráneo.

### 2.1.3 Vegetación.

La vegetación espontánea es un elemento de la naturaleza que varía enormemente de unos lugares a otros en función de las características climáticas y del material de partida o roca madre. De esta forma podemos apreciar que en la zona Norte de la provincia de A Coruña, en la denominada “*Serra da Capelada*”, donde se ubican los perfiles de Mera, Península Masanteo y Mirador de la Capelada, el tipo de vegetación existente está íntimamente relacionada con la proximidad del mar, la altitud y el material de partida que ha dado lugar al suelo que la sustenta, a lo que vienen a añadirse las modificaciones realizadas o asociadas con el uso antrópico del suelo. De esta forma, en las partes bajas de los acantilados podemos encontrar plantas de carácter halófito como *Critium maritimum*, *Cochlearia dánica*, *Armeria pubigera*, *Asplenium maritimum*, *Spergularia rupícola*, *Beta vulgaris* subsp. *maritima*, *Plantago maritima*, *Euphorbia portlandica* y *Silene vulgaris*. Hacia el interior, a niveles de media ladera, predominan en el estrato arbóreo *Quercus robur*, *Castanea sativa*, *Betula pubescens* subsp. *celtibérica*, *Corilus avellana*, además de *Laurus novilis* y *Crataegus monogyna*. En el estrato arbustivo, creciendo junto a las mismas especies, predominan *Pyrus comunis*, *Prunus spinosa*, *Frangula alnus*, *Sambucus nigra*, *Erica arbórea*, *Hedera hélix*, *Tamus communis* y *Ruscus aculeatus*. En último lugar, dentro del estrato herbáceo, habría que destacar la presencia de *Pteridium aquilinum*, *Teucrium scorodonia*, *Blechnum spicant*, *Stellaria holostea*, *Hypericum pulchrum*, *Dryopteris filix-mas*, *Polystichum aculeatum*, *Viola Riviniana*, *Geranium robertianum* y *Holcus mollis* entre otras (Macías y col., 1983).

Por otra parte, en las muestras recogidas en las proximidades de Santiago de Compostela (Fonte Pena Cabaleira, Ladera de Pena Cabaleira, Val do Dubra), en el macizo gabroico de “Monte Castelo”, la vegetación es de tipo arbustivo representada principalmente por *Ulex europaeus*, *Erica cinerea*, *E. erigena*, *Pteridium aquilinum* y *Calluna vulgaris*.

La vegetación incluida en el complejo de Rocas Básicas de Melide (Melide, Xinzo, Forte Vello, Vilouriz, Pena Armada y Monte Castro I y II), así como la existente en la zona de serpentinas de Campo Marzo (Provincia de Pontevedra) merece una especial atención dado que se encuentra incluida dentro de las “*Zonas de Especial Protección dos Valores Naturales*” según Decisión de la Comisión del 7 de diciembre de 2004 ([Diario Oficial da Unión Europea, L 387, de 29 de diciembre de 2004](#)) y el *Decreto 72/2004*, de 2 de Abril, por el que se declaran determinados espacios como “*Zonas de Especial Protección de los Espacios Naturales*”.

El efecto tóxico provocado por la elevada concentración de metales pesados presentes en las rocas ultrabásicas, fundamentalmente por el Ni que es el metal pesado presente de mayor movilidad biogeoquímica, entre otros factores, es un componente que actúa de forma selectiva para la vegetación, fomentando la

especialización y determinando que la zona sea uno de los centros de endemismos más importantes de la Península Ibérica. A parte de poseer un gran número de endemismos serpentínícolas y taxones raros, el área de Melide alberga plantas que, además de endémicas, se las considera amenazadas a escala estatal como es el caso de *Armeria merinoi*, *Santolina melidensis* e *Leucanthemum gallaecicum*.

Otras especies serpentínícolas, más o menos estrictos, aunque menos comprometidos que los mencionados anteriormente son *Alyssum guttiana*, *Anthyllis melidensis*, *Asplenium adiantum-nigrum* var. *corunnense*, *Centaurea janeri* subsp. *gallaecica*, *Euphorbia exigua* subsp. *merinoi*, *Koeleria crassipes*, *Phleum pratense* subsp. *bertolonii*, *Plantago serpentina*, *Sagina merinoi*, *Santolina melidensis*, *Sedum villosum* subsp. *aristatum* y *Thlaspi oligospermum*. Además, un buen número de taxones tienen en esta área sus únicas o casi únicas poblaciones galegas conocidas, como es el caso de *Aster aragonensis*, *Erica scoparia*, *Narcissus conspicuus* o *Seseli montanum* subsp. *montanum*. La umbelífera *Eryngium viviparum*, también en peligro en España, propia de encharcamientos de carácter temporal, mantiene un pequeño núcleo en los alrededores de Melide. El matorral ocupa las dos terceras partes de la superficie del espacio natural y es una de las formaciones más importantes, constituida básicamente por especies de brezo como *Erica vagans*, *Erica scoparia*, *Erica tetralix* y *Erica ciliaris* y jara, como *Cytisus striatus*. La vegetación arbórea cubre, sin embargo, una escasa superficie y es posible encontrar algunas manchas de bosque climático galaico-portugués, caracterizado por la presencia de *Quercus robur* acompañado generalmente por *Ilex aquifolium*, *Frangula alnus* y enriquecido, en algunas ocasiones con *Quercus suber*. Las riberas de los ríos, por otra banda, están flanqueadas en buena parte por el bosque-galería ripario (asociación *Senecio Bayonensis-Alnetum Glutinosae*) (Bartolomé y col., 2005).

Si atendemos a tipos de vegetación presentes en la región de Bragança (Portugal) podemos realizar una diferenciación florística en función del clima predominante en cada una de las zonas de muestreo. De esta forma podemos diferenciar cuatro grandes tipos de vegetación (Agroconsultores e Coba, 1991):

- i) La vegetación natural de Adeganha y Gouveia, incluidas en la región climática **Q5** dentro de la denominada “*Terra Quente Transmontana*”, se integra en el dominio submediterráneo relacionado con la encina (*Quercetum rotundifolia*), teniendo como especies principales: (a) en el estrato arbóreo, *Quercus rotundifolia*, *Quercus faginea*, *Juniperus oxicedrus*; (b) en el estrato arbustivo, *Lygos shaerocarpa*, *Pistacea terebinthus*, *Phillyrea angustifolia*, *Cistus ladanifer*, *Lavandula pedunculata*, *Thymus mastichina*, *Daphne gnidium*, *Cistus albidus* y *Cistus salvifolius*.
- ii) En la región climática **F3** de la denominada “*Terra Fria de Planalto*”, en la que se incluyen los perfiles de Sendim da Serra y Bragança, la vegetación natural se integra fundamentalmente en el dominio ibero-mediterráneo presenta como especies principales *Quercus rotundifolia*, *Quercus pyrenaica* y en menor escala *Quercus faginea*, en el estrato arbóreo, y *Cistus ladanifer*, *Lavandula pedunculata*, *Thymus mastichina*, *Chamaespartium tridentatum*, *Cistus salvifolius*, *Rosa canina* y *Rosa micrantha*, junto con las jaras de los géneros *Cytisus* y *Genista*, en el estrato arbustivo.

- iii) En los perfiles integrados en la denominada “*Terra de Transição*”, Morais I y II y Limãos, bajo la variedad climática **T3**, la vegetación natural se caracteriza por la interpenetración de tres grandes dominios florísticos, el submediterráneo ya mencionado, característico de la “*Terra Quente Transmontana*”, el planáltico ibero-mediterráneo, los dos más representados y, con alguna influencia del sub-atlántico. Tiene como especies principales: (a) en el estrato arbóreo, *Quercus rotundifolia*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus faginea*, *Juniperus oxicedrus* y algún *Castanea sativa*, *Quercus suber* y *Pinus pinaster*; (b) en el estrato arbustivo, en el que se encuentran una gran variedad de especies presentes en los tres dominios mencionados como *Cistus ladanifer*, *Lavandula pedunculata*, *Thymus mastichina*, *Daphne gnidium*, *Chamaespartium tridentatum*, *Arbutus unedo*, *Erica australis* y *Erica tetralix*. En las zonas de rocas ultrabásicas se encuentra la vegetación típica de este tipo de materiales, entre la que destaca *Alyssum pintodasilvae* como indicadora de este tipo de condiciones.
- iv) Por último, en la región climática **F2**, perteneciente, al igual que la F3, a la denominada “*Terra Fria de Planalto*”, en la que se ubica el perfil de A Soeira, la vegetación natural pertenece fundamentalmente al dominio pirenaico-cantábrico o leonés, en el que se hace sentir la influencia atlántica, tiene como especies principales: (a) en el estrato arbóreo, *Quercus pyrenaica*, *Castanea sativa* y *Betula celtiberica*; (b) en el estrato arbustivo, *Erica australis*, *Erica tetralix*, *Chamaespartium tridentatum*, *Halimium alyssoides*, *Rosa canina* y *Rosa micrantha*, junto con las jaras de los géneros *Cytisus* y *Genista*.

## 2.2. Toma de Muestras y Caracterización de los Suelos Estudiados

**Descriptivas de perfiles:** Se realizó una descriptiva *in situ* de los perfiles en el mismo momento de la toma de muestra, siguiendo la “*Guía para la Descripción de Perfiles de Suelos*” (FAO, 1977).

**Toma de muestra y preparación de las mismas:** En todos los perfiles se tomaron muestras representativas de cada horizonte, que posteriormente transportaron al laboratorio en bolsas de plástico debidamente etiquetadas. Una vez aquí fueron secadas al aire y posteriormente tamizadas a través de un tamiz de 2 mm de luz de malla, fracción que se utilizó para los análisis que se describen más adelante.

**Densidad del suelo:** Para la determinación de la densidad de los horizontes de cada suelo se tomaron fracciones de cada uno de ellos, a capacidad de campo, en camisas cilíndricas de acero de volumen conocido. Se determinó al peso seco, secando al aire, y también a 105 °C.

**Humedad del suelo:** La determinación de la humedad, al igual que en caso de la densidad, se ha realizado en la muestra seca al aire y seca a 105° C por diferencia de peso y expresado en tanto por ciento, considerando el 100 % el contenido en agua a capacidad de campo.

**Determinación de color:** Se utilizó la clave Munsell Color (2000) para la determinación del color en húmedo y del color en seco (al aire).

**pH:** Se determinaron los valores de pH en H<sub>2</sub>O y KCl 0.1 M con una relación muestra:disolución de 1:2.5 (Guitian y Carballas, 1976). Además se determinó el pH en NaF estabilizado a pH 8.2, con una relación muestra:disolución de 1:5 (Fieldes y Perrot, 1966), a distintos tiempos (2', 30' y 2 h) con la finalidad de identificar la presencia formas activas de Al tales como alofano e imogolita, Al cambiabile e intercapa y complejos Al-humus (Mizota y Wada, 1980; Wada, 1980).

**Extracciones selectivas de Al, Fe:**

a) *Extracción con pirofosfato sódico (Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O) 0.1 M* (Bascomb, 1968). La finalidad de esta extracción es la solubilización de los complejos orgánicos de Al y Fe (Al<sub>p</sub> y Fe<sub>p</sub>, respectivamente), aunque su acción puede extenderse a formas inorgánicas de Al y Fe. Para minimizar errores en las determinaciones por la posible presencia de partículas en suspensión, e.g., caso de formas inorgánicas de Fe como la ferrihidrita, se procedió al filtrado de los extractos a través de filtros Albet con un tamaño de poro de 0.45 µ.

b) *Extracción con oxalato amónico 0.2 M tamponado a pH 3* (Blakemore, 1983). El extractante es una mezcla de oxalato amónico 0.2 M ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O) y oxalato ácido (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) en proporción 1:0.75 cuyo poder complejante permite la extracción de formas de Al y Fe (Al<sub>o</sub> y Fe<sub>o</sub>, respectivamente) ligadas a óxidos amorfos, óxidos hidratados, aluminosilicatos no cristalinos y a la materia orgánica.

c) *Extracción con ditionito-citrato sódico 0.5 M en medio reductor* (Holmgren, 1967). Se considera que es capaz de solubilizar óxidos cristalinos de Fe, así como de Fe presente en compuestos inorgánicos no cristalinos y asociado a la materia orgánica. Es un buen estimador de la cantidad de Fe libre total (Fe<sub>d</sub>).

d) *Extracción con NaOH 0.5 M* (Borggaard, 1985). Se considera una buena estimación de los compuestos de Al de baja cristalinidad (Al<sub>n</sub>).

En todos los casos, las concentraciones de Al y Fe fueron determinadas mediante espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer 2380, Norwalk, CT).

**Retención de fosfatos:** Se utilizó el método descrito por Blakemore y col. (1981), tal y como lo requiere la WRB (2007) para la determinación para propiedades ándicas.

**Índice Melánico:** Se ha determinado según la metodología de propuesta por Honna y col. (1987), tal y como lo requiere la WRB (2007) para distinguir los Andosoles melánicos de los fúlvicos, en función de si el valor es menor o mayor de 1.7, respectivamente.

**Densidad óptica en extracto de oxalato ácido:** Se realizó siguiendo el método requerido por la WRB (2007) para la determinación de propiedades ándicas. Se basa fundamentalmente en la medida de la absorbancia del extracto de oxalato ácido a 430 nm, utilizando el extractante como blanco. En la determinación de la densidad óptica se utilizó un espectrofotómetro de UV-Visible (model).

**Capacidad de intercambio de cationes (CIC):** La determinación de las bases y Al de cambio se ha determinado según el método descrito por Rhoades (1982). Se basa en la utilización del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> como catión

desplazante en una disolución de acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) tamponada a pH 7, con el fin de determinar la capacidad de intercambio de cationes total de los suelos. Su determinación es fundamental para la clasificación de los perfiles.

**Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE):** La determinación de las bases y Al de cambio se ha determinado según el método descrito por [Peech y col. \(1947\)](#). Se basa en la utilización del  $\text{NH}_4^+$  como catión desplazante en una disolución no tamponada, con el fin de mantener las condiciones de pH lo más próximas a las naturales. Todos los cationes de cambio se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Al}^{+3}$ ) salvo  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  que fueron determinados mediante espectrofotometría de emisión atómica. En la determinación por absorción atómica se añadió un 1% de lantano para evitar interferencias. En ningún caso el pH de los extractos fue inferior a 4,2, por lo que no se estimó necesaria la determinación de protones de cambio.

**Carbono y Nitrógeno totales:** El contenido en C orgánico y N se determinó por combustión de la muestra finamente molida mediante un autoanalizador CHNS-932 (LECO Corp., St. Joseph, MI).

**Carbono dicromato potásico ( $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ )** ([Walkley y Black, 1934](#)). Consiste en la oxidación de materia orgánica mediante la utilización de un oxidante fuerte ( $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ ) en medio ácido. La cantidad de materia orgánica oxidada se ve reflejada en la cantidad de  $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$  que permanece sin reducir y que es susceptible de ser cuantificado mediante la utilización de un reductor como es la Sal de Möhr. Se han realizado dos tipos de oxidación con  $\text{Cr}_2\text{O}_7\text{K}_2$ : i) en caliente; y ii) en frío, lo que nos ha permitido calcular el porcentaje de dos fracciones de C con distinta oxidabilidad. Las determinaciones del C se realizaron por duplicado, para lo que necesaria la elaboración de blancos que fueron tratados de la misma forma que las muestras.

**Fraccionamiento de C basado en el grado de oxidación con permanganato potásico ( $\text{KMnO}_4$ ) 200 mM y 33 mM** ([Blair y col., 1995](#); [Tirol-Padre y Ladha, 2004](#)). Este método está basado en el descrito por [Loginow y col. \(1987\)](#) mediante el cual puede estimarse la fracción de C lábil del suelo, aunque existe controversia sobre la fracción que reacciona con  $\text{KMnO}_4$  ([Tirol-Padre y Ladha, 2004](#)). La cantidad de muestra utilizada para la realización de esta analítica fue la equivalente a un contenido de 15 mg de C. Se realizaron dos oxidaciones: i) una, utilizando  $\text{KMnO}_4$  33 mM; y ii) otra, empleando  $\text{KMnO}_4$  200 mM. En ambos casos se trabajó con un mínimo de tres muestras y tres blancos, para comprobar la reproducibilidad.

**C extraíble con pirofosfato sódico ( $\text{C}_p$ ):** Fue determinado en el mismo extracto que el  $\text{Al}_p$  y  $\text{Fe}_p$  ([Bascomb, 1968](#)), con el fin de estimar el C asociado a estas fracciones. La determinación analítica fue realizada mediante combustión con un equipo TOC-5000 analyzer (Shimadzu Corp., Tokyo, Japan).

**Granulometría:** Se realizó en todos y cada uno de los horizontes de los 28 perfiles objeto de estudio, con la finalidad de conocer la textura de cada uno de ellos. La técnica utilizada está basada en la ley de Stokes (diferencia en la velocidad de sedimentación de las partículas. Consiste básicamente en tomar submuestras de 20 g, por muestra de suelo seco y tamizado, a las que se le van añadiendo pequeñas cantidades de  $\text{H}_2\text{O}_2$  hasta la completa oxidación de la materia orgánica. Una vez oxidada la materia orgánica se añaden 50 mL de HCl, con la

finalidad de disolver los compuestos de Fe y Al que contribuyen a la formación de los agregados, dejándolas en reposo durante 1 h. Posteriormente se procede a un proceso de lavado de la fracción mineral con agua destilada hasta que el test de cloruros, realizado con una disolución de  $\text{AgNO}_3$ , da negativo. A continuación se vierte la fracción mineral en botellas de 1 L junto con 20 mL de calgón (mezcla de hexametáfosfato de sódico y carbonato sódico) para ser agitadas durante 2 h, tiempo suficiente para desagregar la fracción mineral y conseguir su dispersión. Seguidamente, se tamizan las muestras a través de un tamiz de 0.05 mm de luz de malla para separar la fracción arena. El resto del material, todavía en suspensión, se lleva a probetas de 1 L. Mediante una pipeta Robinson se toman alícuotas de 20 mL, en crisoles de cerámica, a distintos tiempos para determinar cada una de las fracciones: i) T0: tiempo cero, se corresponde con una mezcla de limo grueso, limo fino y arcilla; ii) T1: a 4 min. 48 s., que comprende limo fino y arcilla; T2: a 8 h, constituida en su totalidad por arcilla. Cada una de las alícuotas se seca en la estufa a 110° C hasta peso constante. Los resultados, en tanto por cien de cada una de las fracciones, se lleva a un diagrama textural triangular.

**Mineralogía:** La determinación mineralógica se llevó a cabo tanto en los horizontes superficiales como en los subsuperficiales. La separación de la fracción arcilla empleada para la identificación mineral se realizó de la misma forma que en el caso anteriormente descrito para la granulometría hasta la parte de extracción de alícuotas con la pipeta Robinson. En este caso se tomaron los 20 primeros centímetros de cada probeta al cabo de 8 h. El proceso de extracción se realizó varias veces para conseguir la arcilla suficiente para la determinación mineral.

Una vez obtenida la arcilla se procedió a la saturación en  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^+$ , empleando para ello disoluciones de  $\text{Cl}_2\text{Mg}$  y  $\text{ClK}$  respectivamente. Con las arcillas saturadas por ambos cationes se elaboraron los agregados orientados que fueron reiteradamente medidos mediante difracción de RX con radiación  $\text{CuK}\alpha$  en un equipo Philips PM8203 diffractometer (Philips, Wavre, Belgium), según los diversos tratamientos térmicos a los que fueron sometidos: i) los agregados orientados saturados en  $\text{Mg}^{+2}$  fueron medidos a temperatura ambiente; ii) los saturados en  $\text{K}^+$  se midieron a temperatura ambiente y a 110, 330 y 550° C. Los agregados orientados saturados en  $\text{Mg}^{+2}$  fueron posteriormente saturados con etilenglicol, molécula orgánica de gran tamaño que se emplea para el aumento de los espacios intercapa de las arcillas hinchables, y medidos a temperatura ambiente y a 550°C.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Descripción de Perfiles

La descriptiva de los perfiles se realizará en función de las unidades geológicas a las que pertenecen, siguiendo el siguiente esquema:

#### PROVINCIA DE LA CORUÑA

##### 3.1.1.- Perfiles pertenecientes al *Complejo de Cabo Ortegal*:

---



- \* Perfil número 1: Estación de Mera I
- \* Perfil número 2: Estación de Mera II
- \* Perfil número 3: Península de Masanteo
- \* Perfil número 4: Mirador da Capelada

3.1.2.- Perfiles pertenecientes al *Complejo de Órdenes*

- \* Perfil número 5: Goias I
- \* Perfil número 6: Goias II
- \* Perfil número 7: Coristanco

3.1.3.- Perfiles pertenecientes al *Macizo Gabroico de Monte Castelo*

- \* Perfil número 8: Fonte de Pena Cabaleira
- \* Perfil número 9: Ladeira de Pena Cabaleira
- \* Perfil número 10: Val do Dubra

3.1.4.- Perfiles pertenecientes al *Complejo de Rocas de Melide*

- \* Perfil número 11: Melide
- \* Perfil número 12: Xinzo
- \* Perfil número 13: Forte Vello
- \* Perfil número 14: Vilouriz
- \* Perfil número 15: Pena Armada
- \* Perfil número 16: Monte Castro I
- \* Perfil número 17: Monte Castro II

PROVINCIA DE PONTEVEDRA

3.1.5.- Perfiles pertenecientes a la *Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo*

- \* Perfil número 18: Campo Marzo

3.1.6.- Perfiles pertenecientes a la *Unidad de Lalín*

- \* Perfil número 19: Breixa

3.1.7.- Perfiles pertenecientes al *Complejo de Rocas de Melide*

- \* Perfil número 20: Agolada

PORTUGAL

3.1.8.- Perfiles pertenecientes a la *Formación de Desejosa:*

- \* Perfil número 21: Adeganha
- \* Perfil número 22: Gouveia

3.1.9.- Perfiles pertenecientes a la *Formación Cuarcítica:*

- \* Perfil número 23: Sendim da Serra
-



3.1.10.- Perfiles pertenecientes al *Complejo Alóctono Superior*:

- \* Perfil número 24: Morais I
- \* Perfil número 25: Morais II

3.1.11.- Perfiles pertenecientes a la *Unidad de Morais-Talhinhas*:

- \* Perfil número 26: Limãos

3.1.12.- Perfiles pertenecientes al *Macizo de Bragança*:

- \* Perfil número 27: Bragança
- \* Perfil número 28: A Soeira



## PROVINCIA DE LA CORUÑA

*3.1.1.- Complejo de Cabo Ortegal*

- \* Perfil número 1: Estación de Mera I
- \* Perfil número 2: Estación de Mera II
- \* Perfil número 3: Península de Masanteo
- \* Perfil número 4: Mirador da Capelada

*3.1.2.- Complejo de Órdenes*

- \* Perfil número 5: Goias I
- \* Perfil número 6: Goias II
- \* Perfil número 7: Coristanco

*3.1.3.- Macizo Gabroico de Monte Castelo*

- \* Perfil número 8: Fonte de Pena Cabaleira
- \* Perfil número 9: Ladeira de Pena Cabaleira
- \* Perfil número 10: Val do Dubra

*3.1.4.- Complejo de Rocas de Melide*

- \* Perfil número 11: Melide
- \* Perfil número 12: Xinzo
- \* Perfil número 13: Forte Vello
- \* Perfil número 14: Vilouriz
- \* Perfil número 15: Pena Armada
- \* Perfil número 16: Monte Castro I
- \* Perfil número 17: Monte Castro II



## 3.1.1.- Complejo de Cabo Ortegal:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>1 – ESTACIÓN DE MERA I</b>
Fecha de observación -----	07-05-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0588672 4832531 coord. Geog: 43°38'30''N 7°53'57''W
Altitud -----	105 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Asphodelus albus</i> , gramíneas; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-seco

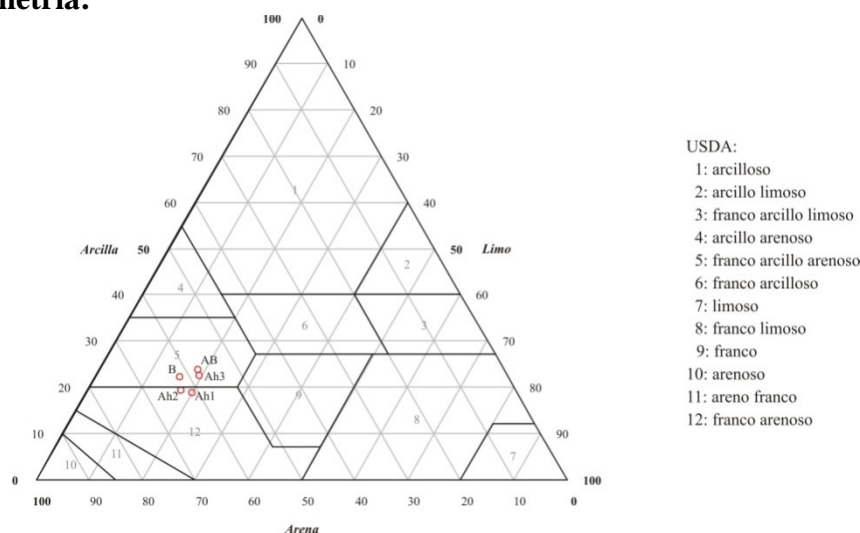
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Típico</b>
Drenaje -----	Bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 0; sin piedras o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso parcelas

## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 20	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable; porosidad abundante; límite inapreciable
Ah <sub>2</sub>	20 – 60	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable; porosidad abundante; límite inapreciable
Ah <sub>3</sub>	60 – 80	Pardo muy oscuro 10 YR 2/2 en húmedo y pardo oscuro 10 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable; porosidad abundante; límite gradual
BA	80 – 105	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo amarillento oscuro 10 YR 4/4 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable; porosidad abundante; límite gradual
B	>105	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable; porosidad abundante; límite neto

## 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	61.1	franco arenoso	AB	Arena	57.5	franco arcillo arenoso
	Limo	20.1			Limo	18.9	
	Arcilla	18.8			Arcilla	23.6	
Ah <sub>2</sub>	Arena	63.0	franco arenoso	B	Arena	61.8	franco arcillo arenoso
	Limo	17.7			Limo	16.0	
	Arcilla	19.3			Arcilla	22.2	
Ah <sub>3</sub>	Arena	58.0	franco arcillo arenoso				
	Limo	19.8					
	Arcilla	22.2					



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----  
 Fecha de observación -----  
 Ubicación -----

#### 2 – ESTACIÓN DE MERA II

07-05-2005  
 coord. UTM: 29 T 0588672 4832531  
 coord. Geog: 43°38'30''N 7°53'57''W

Altitud -----  
 Posición fisiográfica -----  
 Forma del terreno circundante -----  
 Pendiente -----  
 Vegetación y/o uso de la tierra -----

105 m  
 Ladera cóncava  
 Ondulado  
 Clase 3; inclinado  
*Eucalyptus globulus*, *Pteridium aquilinum*, *Asphodelus albus*, gramíneas; uso forestal

Clima (régimen ombrotérmico) -----

Cálido-seco

### 2.- Información general acerca del suelo:

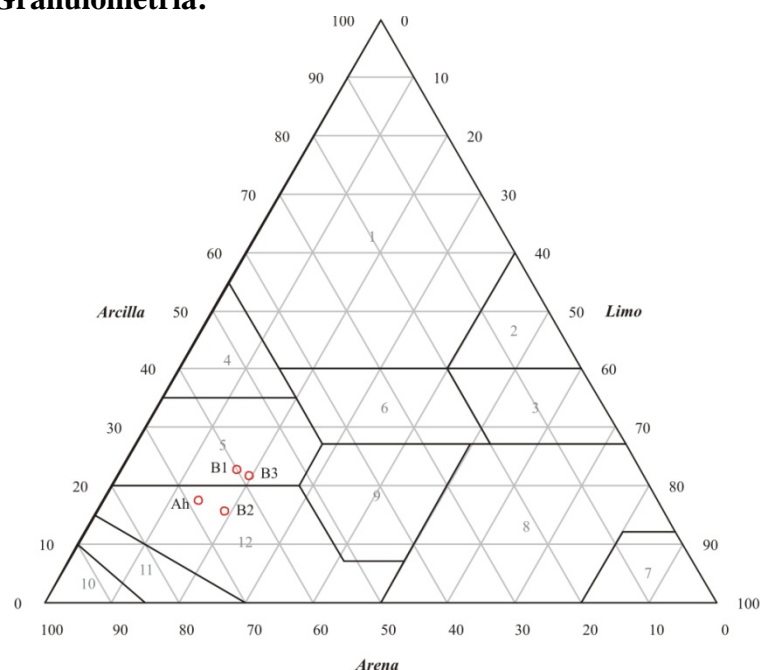
Material de partida -----  
 Clasificación del suelo -----  
 Drenaje -----  
 Condiciones de humedad -----  
 Pedregosidad -----  
 Afloramientos rocosos -----  
 Evidencias de erosión -----  
 Influencia humana -----

Anfibolita  
 Ferralsol Vetí-úmbrico (húmico, alúmico, dístrico, xántico)  
 // Xanthic Hapludox  
 Clase 4; bien drenado  
 Capacidad de campo  
 Clase 0; no hay o muy pocos  
 Clase 0  
 No  
 Ejecución de pista de acceso a parcelas

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 40	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina, ligeramente adherente, ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite gradual
B <sub>1</sub>	40 – 82	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 4/6 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico, friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite difuso
B <sub>2</sub>	82 – 150	Pardo amarillento oscuro 10 YR 4/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; no plástico, friable en húmedo y duro en seco; porosidad abundante; límite difuso
B <sub>3</sub>	150 – 180	Pardo 7.5 YR 4/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/4 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro en seco; porosidad abundante; límite neto
C	>180	

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah	Arena	68.4	franco arenoso	B <sub>2</sub>	Arena	65.4	franco arenoso
	Limo	14.3			Limo	19.1	
	Arcilla	17.2			Arcilla	15.5	
B <sub>1</sub>	Arena	59.9	franco arcillo arenoso	B <sub>3</sub>	Arena	58.6	franco arcillo arenoso
	Limo	17.6			Limo	19.9	
	Arcilla	22.6			Arcilla	21.5	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>3 – PENÍNSULA DE MASANTEO</b>
Fecha de observación -----	07-05-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0591166 4842503 coord. Geog: 43°43'48''N 7°52'05''W
Altitud -----	136 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 4; moderadamente escarpado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Eucalyptus globulus</i> ; <i>Pteridium aquilinum</i> ; <i>Rubus spp.</i>
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-seco

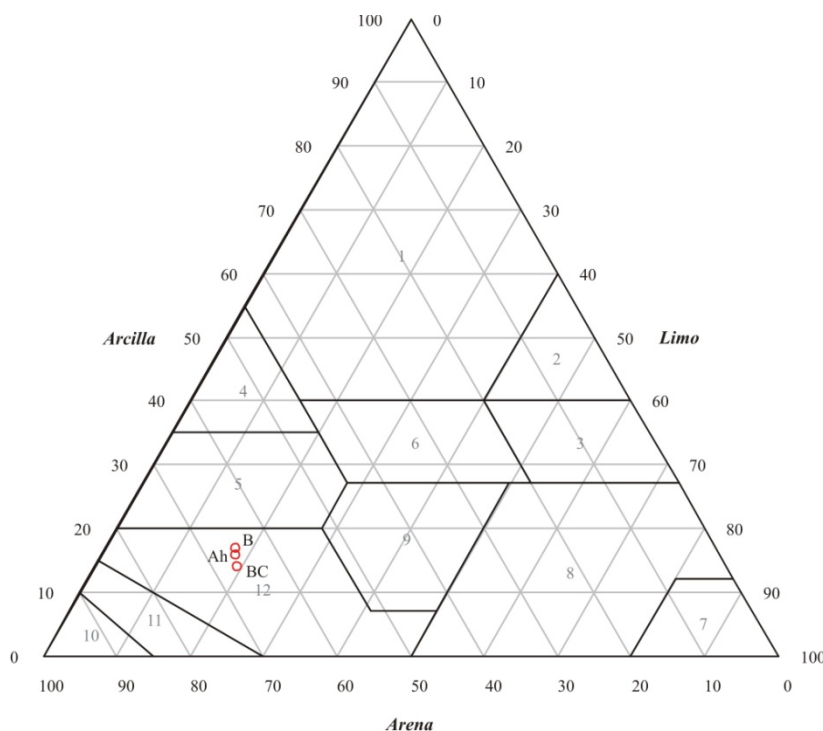
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Gneis
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Ferrali-ándico (húmico, alúmico, hiperdistrico, arénico) // Distrudept Ándico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso a parcelas forestales

## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0 – 20	Negro 10 YR 2/1 en húmedo y pardo muy oscuro 10 YR 2/2 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite difuso
B	20 – 50	Negro 10 YR 2/1 en húmedo y pardo grisáceo muy oscuro 10 YR 3/2 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite neto
BC	50 – 110	Pardo amarillento oscuro 10 YR 3/6 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 con frecuentes manchas amarillo rojizas; estructura migajosa con zonas de saprolita; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y duro en seco; porosidad abundante
C	>110	

## 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	65.9	franco arenoso
	Limo	18.5	
	Arcilla	15.6	
B	Arena	65.3	franco arenoso
	Limo	17.9	
	Arcilla	16.8	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
BC	Arena	66.6	franco arenoso
	Limo	19.5	
	Arcilla	13.9	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>4 – MIRADOR DA CAPELADA</b>
Fecha de observación -----	07-05-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0580944 4837133 coord. Geog: 43°40'58''N 7°59'45''W
Altitud -----	360 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Pastizal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-subhúmedo

### 2.- Información general acerca del suelo:

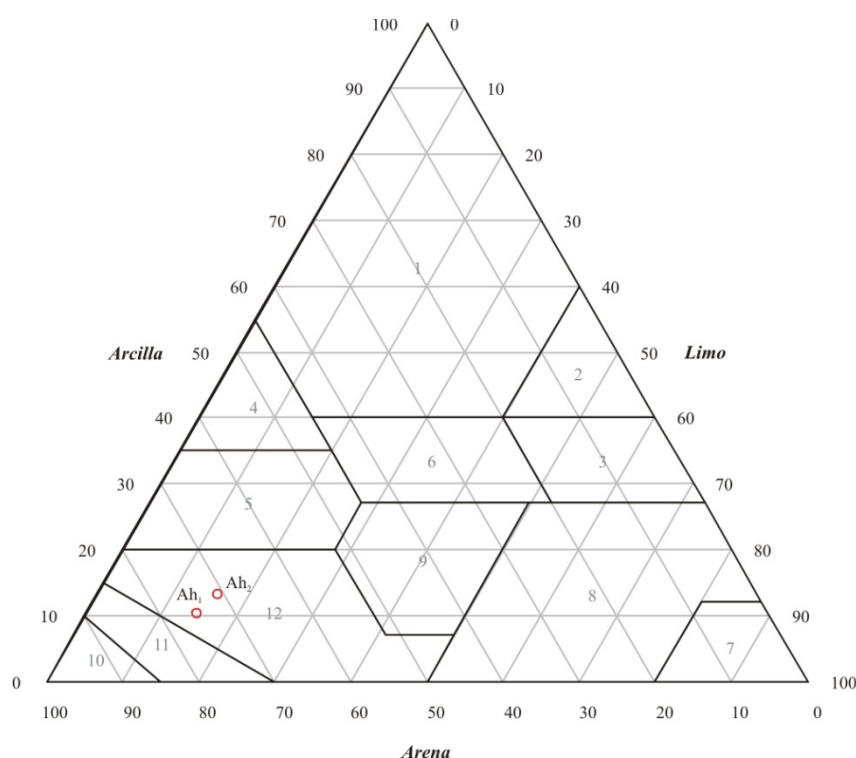
Material de partida -----	Roca metabásica, facies granulita
Clasificación del suelo -----	Andosol Melani-aluándico (dístico) // Melanudand Páchico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso a parcelas.



### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 30	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite difuso
Ah <sub>2</sub>	30 – 70	Negro 10 YR 2/1 en húmedo y pardo muy oscuro 10 YR 2/2 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; porosidad abundante; límite difuso

### 4.- Granulometría:

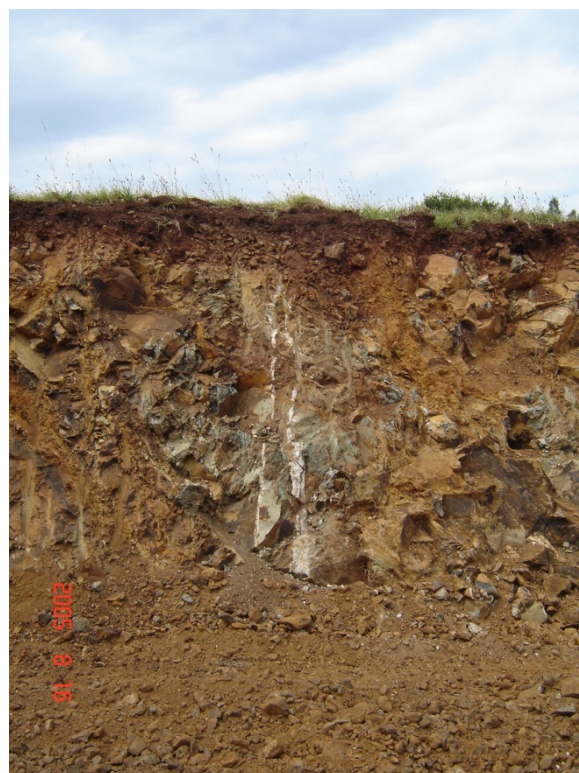


USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	75.2	franco arenoso	Ah <sub>2</sub>	Arena	71.0	franco arenoso
	Limo	14.7			Limo	16.0	
	Arcilla	10.1			Arcilla	13.0	

## 3.1.2.- Complejo de Órdenes:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>5 – GOIAS I</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0522474 4787289 coord. Geog: 43°14'17''N 8°43'24''W
Altitud -----	157 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2, ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Pastizal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-húmedo

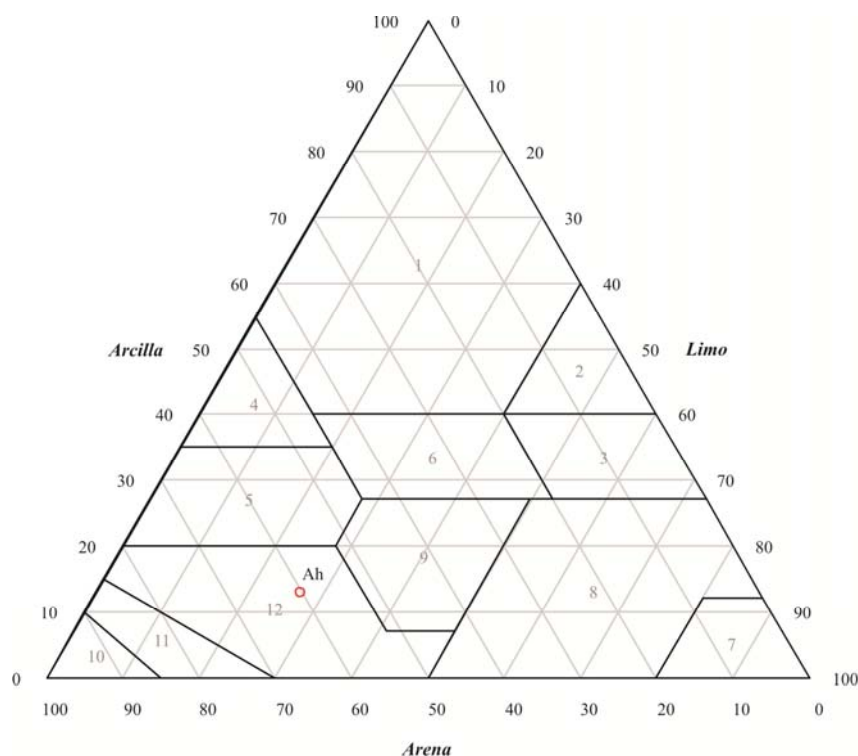
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Andi-lítico (dístico) // Udipsamment Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4, bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso (esqueletado)
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de Autovía

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0 – 10	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad abundante; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de raíces finas en toda su extensión; límite neto
R	>10	

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah	Arena	60.2	franco arenoso
	Limo	27.0	
	Arcilla	12.8	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>6 – GOIAS II</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0522481 4787311 coord. Geog: 43°14'18''N 8°43'23''W
Altitud -----	158 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2, ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Pastizal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-húmedo

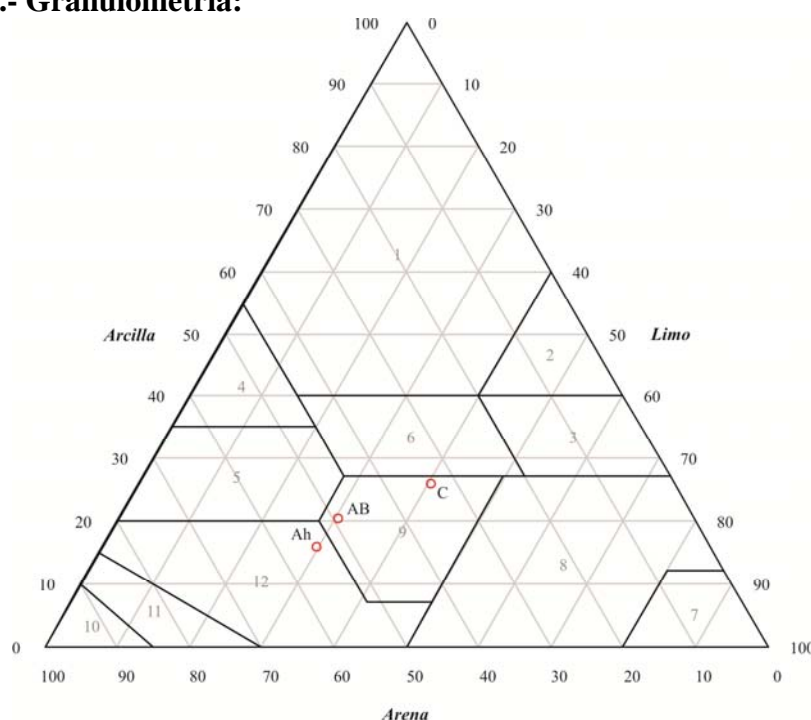
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Típico</b>
Drenaje -----	Clase 4, bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso (esqueletado)
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de Autovía

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0 – 40	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; muy pedregoso; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta abundantes raíces finas; límite gradual
AB	40 – 60	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/4 en seco; débil estructura migajosa fina; muy pedregoso; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de raíces finas; límite neto
C	60 – >200	Pardo 7.5 YR 4/4 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 5/6 en seco; horizonte de profundidad variable; débil estructura migajosa media; excesiva pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de raíces finas aunque en pequeña cantidad; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah	Arena	54.4	franco arenoso
	Limo	29.9	
	Arcilla	15.6	
AB	Arena	49.2	franco
	Limo	30.6	
	Arcilla	20.2	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
C	Arena	33.7	franco
	Limo	40.6	
	Arcilla	25.7	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>7 - CORISTANCO</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0519803 4781207 coord. Geog: 43°11'00''N 8°45'23''W
Altitud -----	128 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2, ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Cultivo rotacional mixto
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-húmedo

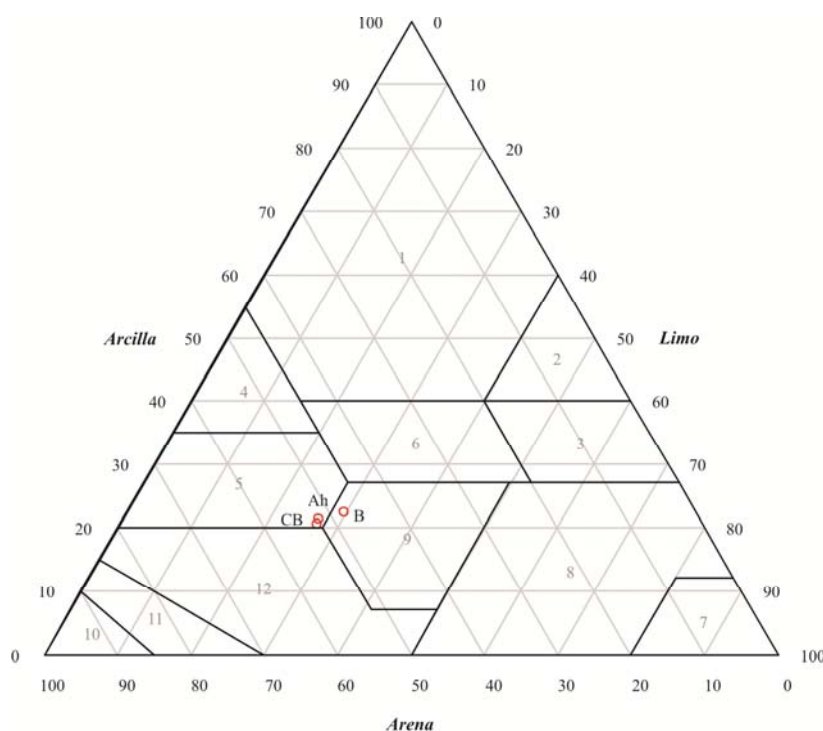
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Típico</b>
Drenaje -----	Clase 4, bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de Autovía

## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0 – 40	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad abundante; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes de raíces finas; límite gradual
B	40 – 70	Pardo 10 YR 3/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; débil estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta abundantes raíces finas; límite gradual
CB	70 – 100	Pardo 10 YR 3/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/8 en seco; débil estructura migajosa fina; gran cantidad de piedras <i>in situ</i> ; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando a duro en seco; presenta abundantes poros; presenta una pequeña cantidad de raíces finas; límite neto

## 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah	Arena	51.7	franco arcillo arenoso	CB	Arena	52.4	franco arcillo arenoso
	Limo	26.9			Limo	27.0	
	Arcilla	21.4			Arcilla	20.6	
B	Arena	48.0	franco				
	Limo	29.7					
	Arcilla	22.3					



## 3.1.3.- Macizo Gabroico de Monte Castelo:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>8 –FONTE DE PENA CABALEIRA</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0525599 4772216 coord. Geog: 43°06'08''N 8°41'07''W
Altitud -----	436 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Pteridium aquilinum</i> ; <i>Erica</i> spp.; <i>Ulex</i> spp.; gramíneas
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-muy húmedo

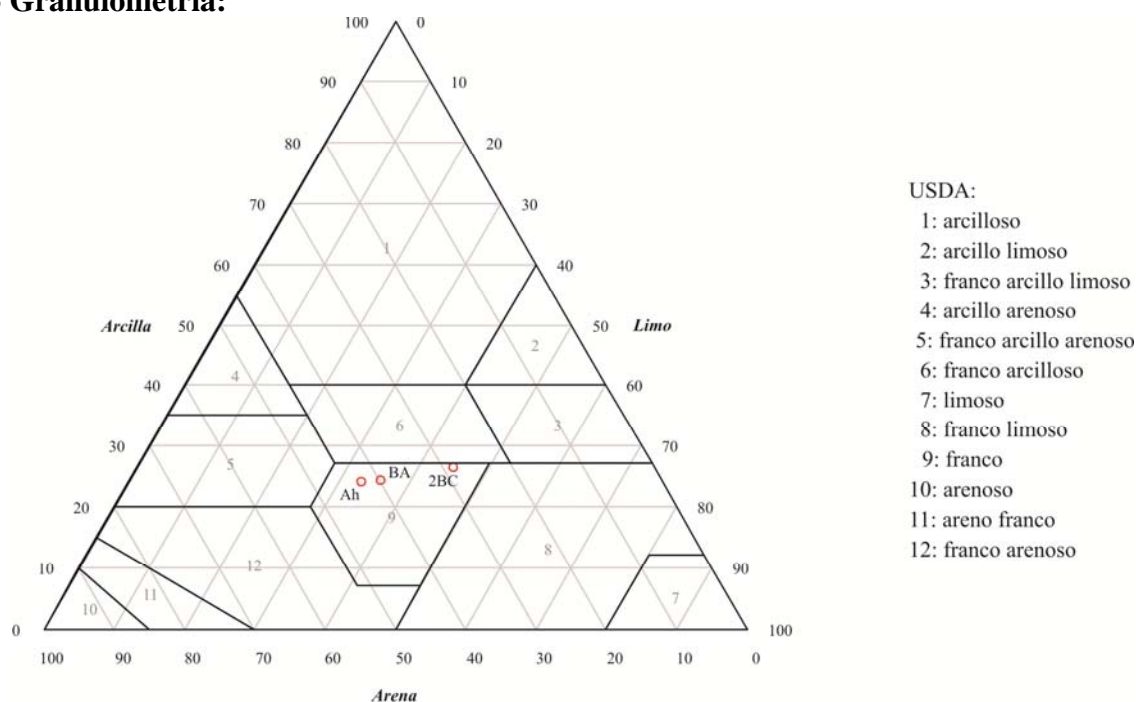
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Gabro
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol</b> <b>Melani-aluándico</b> (acróxico, dístrico) //
	<b>Melanudand Típico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0;
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso a parcelas de uso forestal

## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 35	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta abundantes raíces de tamaño fino en toda su extensión; límite gradual; horizonte muy suelto y con piedras en toda su extensión, aunque más abundantes en la base
BA	35 – 90	Pardo 7.5 YR 4/4 en húmedo y amarillo rojizo 7.5 YR 6/6 en seco; débil estructura migajosa media; escasa pedregosidad aunque presenta pequeños fragmentos de gabra fresco; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y duro en seco; presenta abundantes poros; no presenta gran cantidad de raíces; límite gradual
2BC	90 – >130	Pardo fuerte 7.5 YR 5/6 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 5/8 en seco; débil estructura poliédrica; escasa pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro en seco; presenta abundantes poros; continúa presentando raíces; límite neto

## 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah	Arena	42.8	franco	2BC	Arena	28.5	franco
	Limo	33.2			Limo	45.3	
	Arcilla	24.0			Arcilla	26.3	
BA	Arena	39.9	franco				
	Limo	35.9					
	Arcilla	24.2					





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>9 – LADEIRA DE PENA CABALEIRA</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0525411 4771465 coord. Geog: 43°05'44''N 8°41'16''W
Altitud -----	523 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Pteridium aquilinum</i> ; <i>Rubus</i> spp.; gramíneas; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-muy húmedo

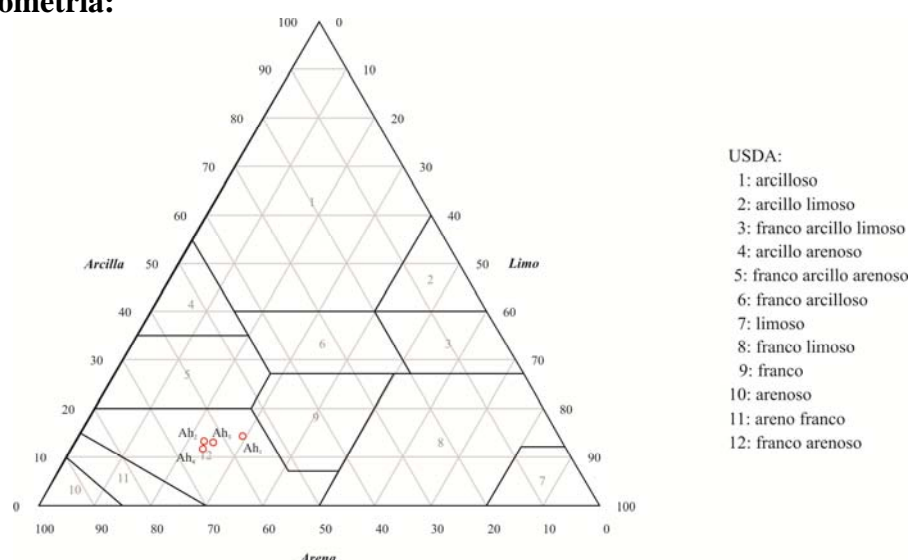
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Gabro
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Páchico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso a polígono de explotación de parque eólico

## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 30	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad prácticamente nula; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y de suelto a blando en seco; presenta abundantes poros; presenta gran cantidad de raíces finas; límite difuso
Ah <sub>2</sub>	30 – 80	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad prácticamente nula; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y de suelto a blando en seco; presenta abundantes poros; presenta gran cantidad de raíces finas aunque de forma menos abundante en comparación con el caso anterior; límite difuso
Ah <sub>3</sub>	80 – 150	Gris muy oscuro 7.5 YR 3/1 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad prácticamente nula; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y de suelto a blando en seco; presenta abundantes poros; presenta raíces finas; existencia de huellas de quemado (80 – 100 cm); límite difuso
Ah <sub>4</sub>	150 – >200	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa pedregosidad prácticamente nula; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y de suelto a blando en seco; presenta abundantes poros; presenta raíces finas aunque en menor cantidad que en las horizontes js más superficiales; límite difuso

## 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	56.3	franco arenoso	Ah <sub>3</sub>	Arena	62.2	franco arenoso
	Limo	29.6			Limo	25.0	
	Arcilla	14.1			Arcilla	12.8	
Ah <sub>2</sub>	Arena	63.7	franco arenoso	Ah <sub>4</sub>	Arena	64.7	franco arenoso
	Limo	23.1			Limo	23.6	
	Arcilla	13.2			Arcilla	11.7	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>10 – VAL DO DUBRA</b>
Fecha de observación -----	16-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0526702 4767961 coord. Geog: 43°03'50''N 8°40'19''W
Altitud -----	405 m
Posición fisiográfica -----	Labio superior Fractura Meridiana
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Ulex spp.; <i>Pteridium aquilinum</i> ; gramíneas; <i>Eucalyptus globulus</i> ; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-muy húmedo

### 2.- Información general acerca del suelo:

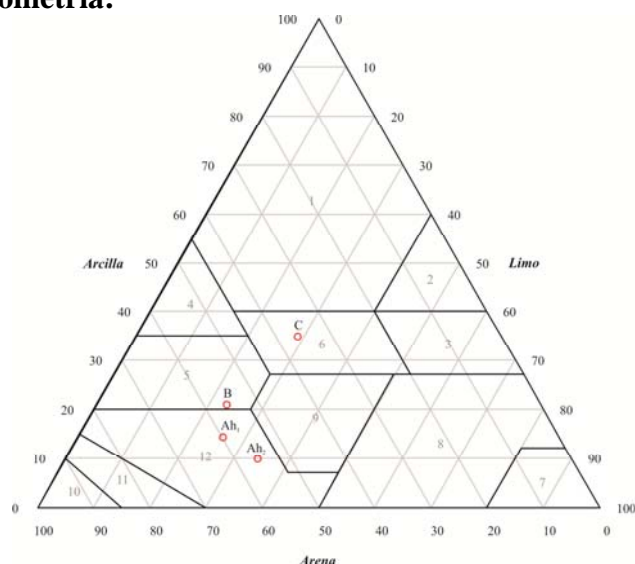
Material de partida -----	Gabro
Clasificación del suelo -----	Andosol Fulvi-silándico (acróxico, districo) // Fulvudand Páchico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 2; rocoso
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera comarcal de Val do Dubra



## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 35	Pardo muy oscuro 10 YR 2/2 en húmedo y pardo oscuro 10 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta abundantes raíces de tamaño fino en toda su extensión; límite neto
	35 – 50	Línea de piedras
Ah <sub>2</sub>	50 – 80	Pardo muy oscuro 10 YR 2/2 en húmedo y pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en seco; débil estructura migajosa fina; presenta abundantes gravas y piedras en toda su extensión; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta numerosos poros; límite gradual
B	80 – 110	Pardo oscuro 10 YR 3/3 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; débil estructura migajosa fina; presenta baja pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta numerosos poros; límite gradual
C	110 - >200	Pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/8 en seco; estructura de saprolita media; muy pedregoso en toda su extensión; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y muy duro en seco; presenta numerosos poros; límite gradual

## 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	59.8	franco arenoso	B	Arena	55.7	franco arcillo arenoso
	Limo	26.1			Limo	23.5	
	Arcilla	14.2			Arcilla	20.8	
Ah <sub>2</sub>	Arena	55.8	franco arenoso	C	Arena	36.2	franco arcilloso
	Limo	34.4			Limo	28.9	
	Arcilla	9.8			Arcilla	34.9	



## 3.1.4.- Complejo de Rocas de Melide:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>11 - MELIDE</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0579293 4751896 coord. Geog: 42°54'56''N 8°01'43''W
Altitud -----	419 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 1; llano o casi llano
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Erica spp. Ulex spp. y gramíneas; Monte bajo
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

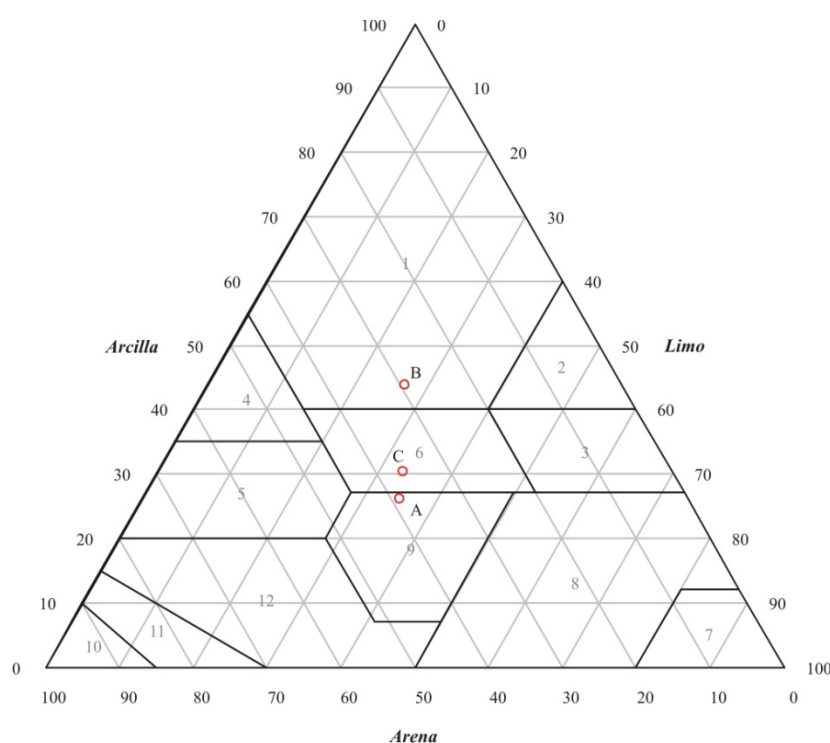
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Peridotita (Roca ultrabásica serpentinizada)
Clasificación del suelo -----	<b>Cambisol Léptico // Dystrudept Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 2; rocoso
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera nacional N-547 (Santiago – Lugo)

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 10	Rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/3 en húmedo y rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/4 en seco; estructura granular fina; presencia de abundante piedras sueltas; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y duro en seco; porosidad abundante; límite gradual
B	10 – 40	Pardo rojizo oscuro 5 YR 3/4 en húmedo y pardo rojizo 5 YR 4/4 en seco; débil estructura granular fina; evidencias de contacto paralítico con afloramientos rocosos no alterados; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro en seco; porosidad abundante; límite neto
C	40 – 60	Pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; estructura de saprolita reconociéndose el material de partida; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y muy duro en seco; presencia de fragmentos de material de partida escasamente alterados; porosidad abundante

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	39.0	franco	C	Arena	36.4	franco arcilloso
	Limo	35.0			Limo	33.4	
	Arcilla	26.0			Arcilla	30.2	
B	Arena	29.4	arcilloso				
	Limo	27.0					
	Arcilla	43.7					





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>12 – XINZO</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0578204 4752679 coord. Geog: 42°55'22''N 8°02'30''W
Altitud -----	442 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; suavemente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Rubus</i> spp., <i>Eucalyptus globulus</i> , <i>Ulex</i> spp., Gramíneas
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

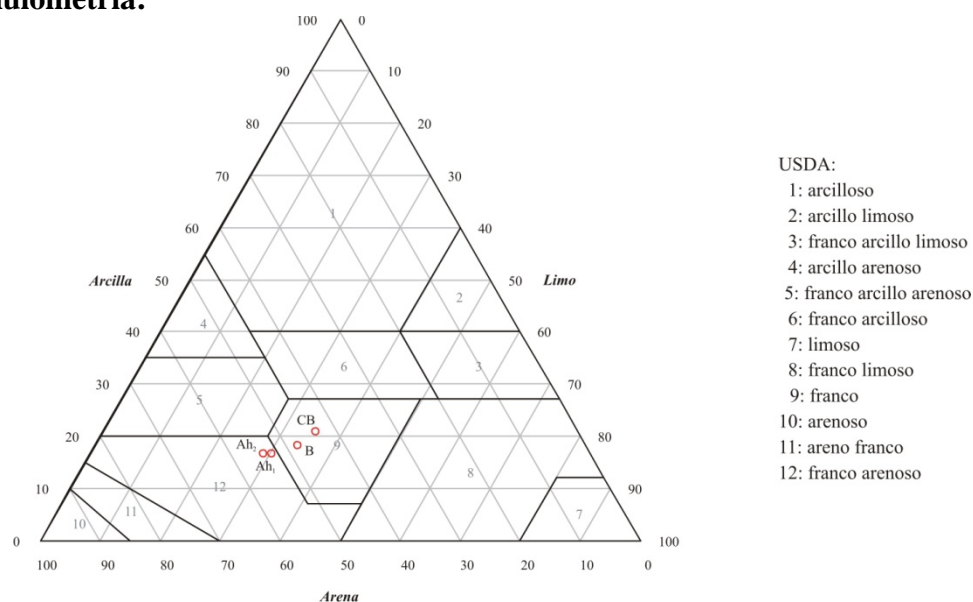
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Flasher anfíbolita
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Típico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de acceso a parcelas

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 20	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; poros abundantes; presencia de abundantes raíces finas en toda su extensión; límite difuso
Ah <sub>2</sub>	20 – 60	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; poros abundantes ; presencia de raíces finas en toda su extensión; límite neto
B	60 – 80	Pardo 7.5 YR 4/3 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; débil estructura poliédrica fina; presencia de fragmentos del material de partido parcialmente alterados; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y duro en seco; poros abundantes; escasa presencia de raíces de tamaño medio; límite gradual
CB	80 – 120	Pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo y amarillo parduzco 10 YR 6/6 en seco; débil estructura poliédrica media; presencia de fragmentos del material de partida sin alterar; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable e húmedo y muy duro en seco; poros abundantes; límite gradual

### 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	53.0	franco arenoso	B	Arena	47.9	franco
	Limo	30.4			Limo	34.0	
	Arcilla	16.6			Arcilla	18.1	
Ah <sub>2</sub>	Arena	54.5	franco arenoso	CB	Arena	43.7	franco
	Limo	29.1			Limo	35.6	
	Arcilla	16.4			Arcilla	20.7	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>13 – FORTE VELLO</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0580836 4753026 coord. Geog: 42°55'32''N 8°00'34''W
Altitud -----	434 m
Posición fisiográfica -----	Bancal
Forma del terreno circundante -----	Bancal
Pendiente -----	Clase 2; suavemente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Cultivo rotacional mixto
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

### 2.- Información general acerca del suelo:

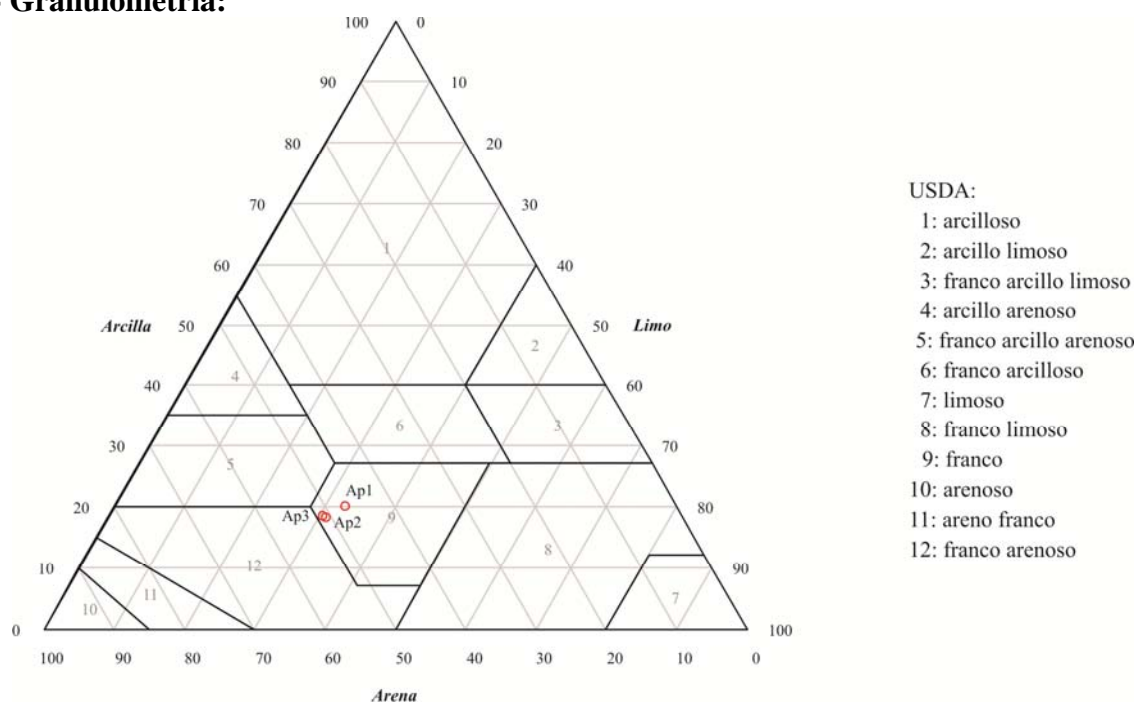
Material de partida -----	Roca Metabásica en facies granulita
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Háplico (húmico, alúmico, districo, páchico, láxico) // Haplantrept Típico Páchico
Drenaje -----	Clase 4 bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy poca
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera comarcal



### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap <sub>1</sub>	0 – 30	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/3 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa presencia de gravas; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; poros abundantes; presencia de raíces finas en su parte superior y más gruesas a medida que se aumenta la profundidad; límite difuso
Ap <sub>2</sub>	30 – 100	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/4 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa presencia de gravas; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y de blando a duro en seco; poros abundantes; presencia de raíces de tamaño medio; límite difuso
Ap <sub>3</sub>	100 – 210	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/4 en seco; débil estructura migajosa fina; mayor presencia de gravas y piedras de anfíbolita escasamente alterada, que en los horizontes superficiales; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y de duro ablando en seco; poros abundantes; escasa presencia de raíces de tamaño medio; límite difuso

### 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ap <sub>1</sub>	Arena	47.0	franco
	Limo	33.1	
	Arcilla	19.9	
Ap <sub>2</sub>	Arena	50.6	franco
	Limo	31.2	
	Arcilla	18.2	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ap <sub>3</sub>	Arena	50.9	franco
	Limo	30.6	
	Arcilla	18.5	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>14 – VILOURIZ</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0586525 4755722 coord. Geog: 42°56'57''N 7°56'22''W
Altitud -----	570 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Ulex spp. y Erica spp.
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

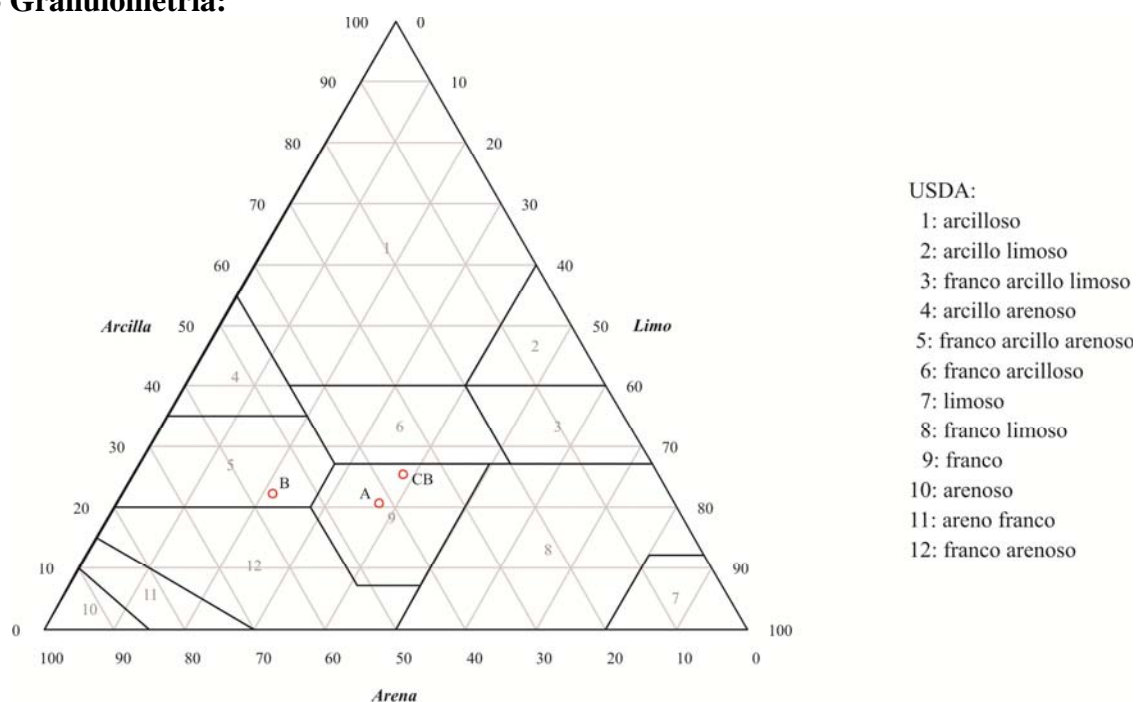
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Serpentina
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Cámbico // Dystrudept Lítico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso; suelo esqueletado
Afloramientos rocosos -----	Clase 2, rocoso
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera local

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 30	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en seco; débil estructura migajosa fina; presencia de gravas y piedras de tamaño medio; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; poros abundantes; presencia de raíces finas en su parte superficial y más gruesas y escasas a medida que se descende en profundidad; límite gradual
B	30 – 45	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/4 en seco; moderada estructura migajosa; presenta piedras en toda su extensión; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y duro en seco; poros abundantes; límite gradual
CB	>45	Pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo y amarillo parduzco 10 YR 6/6 en seco; débil estructura poliédrica media; presenta piedras de tamaño medio en toda su extensión; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y duro en seco; poros abundantes; límite lítico

### 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	41.9	franco
	Limo	37.7	
	Arcilla	20.4	
B	Arena	56.2	Franco arcillo arenoso
	Limo	21.7	
	Arcilla	22.1	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
CB	Arena	36.2	franco arcilloso
	Limo	38.5	
	Arcilla	25.4	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>15 – PENA ARMADA</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coordenadas UTM: 29 T 0589640 4757947 coord. Geográficas: 42°58'08''N 7°54'03''W
Altitud -----	741 m
Posición fisiográfica -----	Ladera cóncava
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; suavemente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Asphodelus albus</i> ; <i>Erica</i> spp.; gramíneas; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

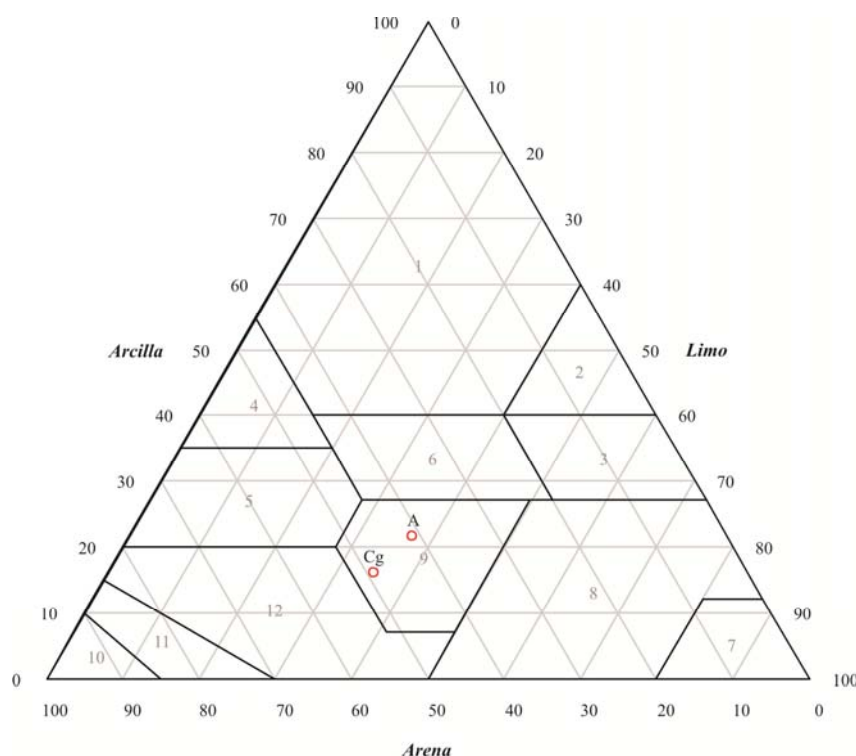
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Serpentina
Clasificación del suelo -----	<b>Umbrisol Endogleyico // Dystrudept Ácuico Húmico</b>
Drenaje -----	Clase 3, moderadamente bien drenado, en su parte superior y Clase 2, imperfectamente drenado, en su parte más profunda
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 1; moderadamente pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 1; moderadamente rocoso
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista de acceso a parcelas forestales

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 25	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; presencia de gravas y piedras de tamaño medio en toda su extensión; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presencia de abundantes poros aunque el drenaje se produce preferencialmente los bordes de las gravas y piedras; presencia de raíces finas en su parte superficial y más gruesas y escasas a medida que se desciende; límite neto
Cg	25 – 47	Pardo oscuro 10 YR 3/3 , con presencia de frecuentes manchas amarillas 2.5 Y 7/8, en húmedo y pardo amarillento claro 10 YR 6/4 en seco; estructura masiva; ligeramente adherente; no plástico; firme a muy firme en húmedo y muy duro en seco; poros escasos y el drenaje se produce por los intersticios de los fragmentos de material de partida escasamente alterados; presencia de raíces medias; límite brusco

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	41.1	franco	Cg	Arena	49.0	franco
	Limo	37.2			Limo	35.1	
	Arcilla	21.7			Arcilla	15.9	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>16 – MONTE CASTRO I</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0586904 4752192 coord. geográficas: 42°55'02''N 7°54'08''W
Altitud -----	530 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Ulex spp.; gramíneas
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

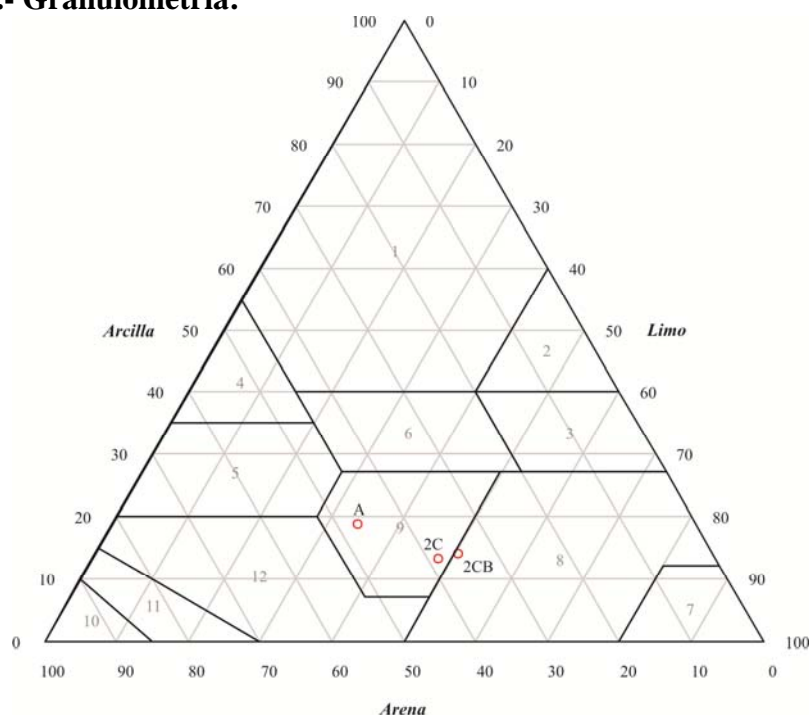
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Flasher anfíbolita
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Cámbico (húmico, alúmico, hiperdístico) // Dystrudept Húmico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 1; moderadamente pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista para acceso a Parque Eólico

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 28	Negro 10 YR 2/1 en húmedo y pardo oscuro 10 YR 3/3 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presencia de abundantes poros; presenta línea de piedras en su parte basal indicando proceso de policiclismo; abundantes raíces finas; límite neto
2BC	28 – 128	Pardo amarillento 10 YR 5/6 en húmedo y amarillo parduzco 10 YR 6/6 en seco; débil estructura poliédrica; presenta línea de piedras en su parte superior y abundantes gravas en toda su extensión; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro en seco; presenta abundantes poros; límite gradual
2C	>128	Pardo amarillento 10 YR 5/8 en húmedo y amarillo parduzco 10 YR 6/6 en seco; débil estructura poliédrica fina con zonas de saprolita; presencia de abundantes gravas en toda su extensión; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y muy duro en seco; presencia de abundantes poros; límite gradual

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	46.9	franco
	Limo	34.5	
	Arcilla	18.6	
2CB	Arena	35.5	franco limoso
	Limo	50.6	
	Arcilla	13.9	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
2C	Arena	38.6	franco
	Limo	48.2	
	Arcilla	13.2	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>17 – MONTE CASTRO II</b>
Fecha de observación -----	14-06-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0587003 4751005 coord. geográficas: 42°54'24''N 7°56'03''W
Altitud -----	645 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Ulex spp.; gramíneas
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Fresco-muy húmedo

### 2.- Información general acerca del suelo:

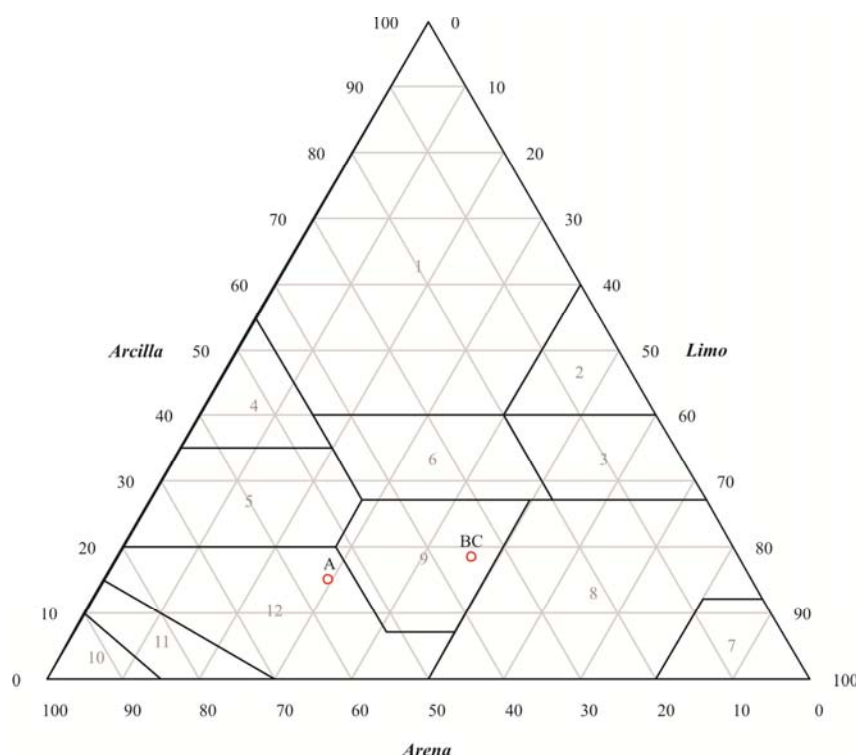
Material de partida -----	Flasher anfibolita
Clasificación del suelo -----	<b>Andosol Fulvi-aluándico (dístico) // Fulvudand Típico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Capacidad de campo
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso; la densidad puede dar problemas
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista para acceso a Parque Eólico



### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 35	Negro 7.5 YR 2.5/1 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en seco; estructura migajosa fina; presenta abundantes gravas y piedras; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta abundantes raíces de tamaño fino en toda su extensión; límite neto
BC	35 – 75	Pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; estructura masiva; presenta abundantes gravas y piedras en toda su extensión; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y muy duro en seco; presenta numerosos poros; límite gradual
C	>75	

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	55.4	franco arenoso	BC	Arena	35.1	franco
	Limo	29.6			Limo	46.6	
	Arcilla	15.0			Arcilla	18.4	

## PROVINCIA DE PONTEVEDRA

### *3.1.5.- Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo*

\* Perfil número 18: Campo Marzo

### *3.1.6.- Unidad de Lalín*

\* Perfil número 19: Breixa

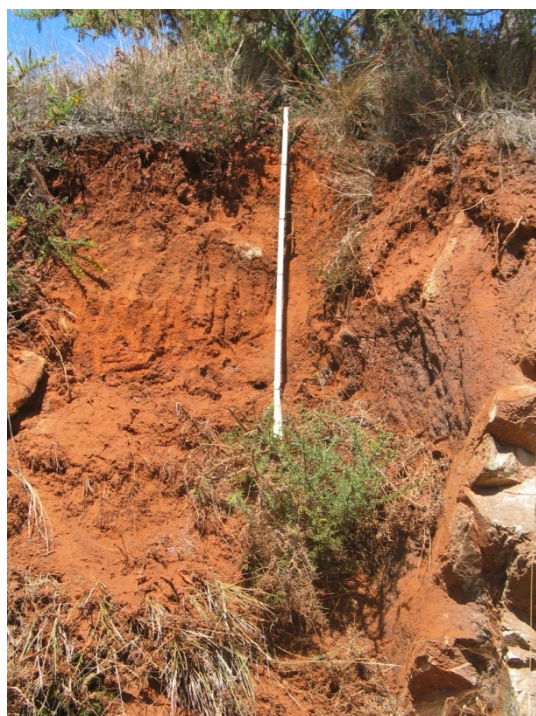
### *3.1.7.- Complejo de Rocas de Melide*

\* Perfil número 20: Agolada





## 3.1.5.- Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>18 – CAMPO MARZO</b>
Fecha de observación -----	29-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0557450 4733355 coord. Geog: 42°45'02''N 8°17'53''W
Altitud -----	304 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Ulex spp.; gramíneas; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-muy húmedo

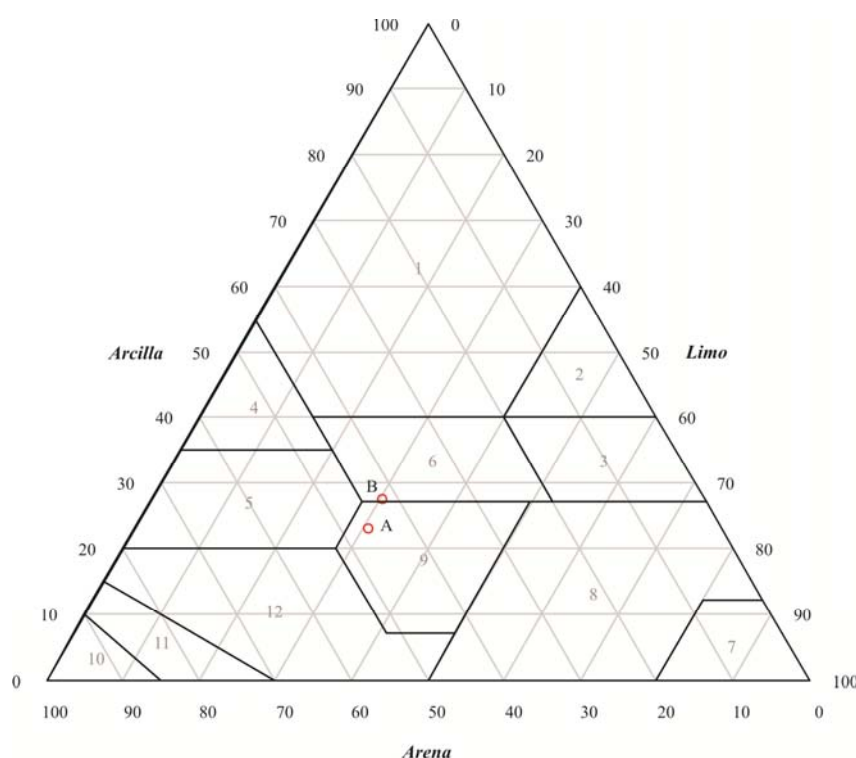
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Rocas ultrabásicas serpentinizadas ricas en magnetita
Clasificación del suelo -----	<b>Cambisol Ferrálico // Dystrudept Óxico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (más seco que capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 1
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera comarcal Vila de Cruces - Bandeira

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 40	Horizonte de profundidad variable y en ocasiones prácticamente inexistente; rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/3 en húmedo y rojo oscuro 2.5 YR 3/6 en seco; débil estructura migajosa fina; ligeramente adherente; no plástico y con una consistencia firme en húmedo y duro en seco; poros abundantes y presenta escasas raíces finas; límite gradual.
B	40 – >100	Horizonte discontinuo y en ocasiones inexistente; rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/3 en húmedo y rojo oscuro 2.5 YR 4/6 en seco; débil estructura migajosa media; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presencia de muy escasas raíces de porte fino; límite neto.

### 4.- Granulometría:

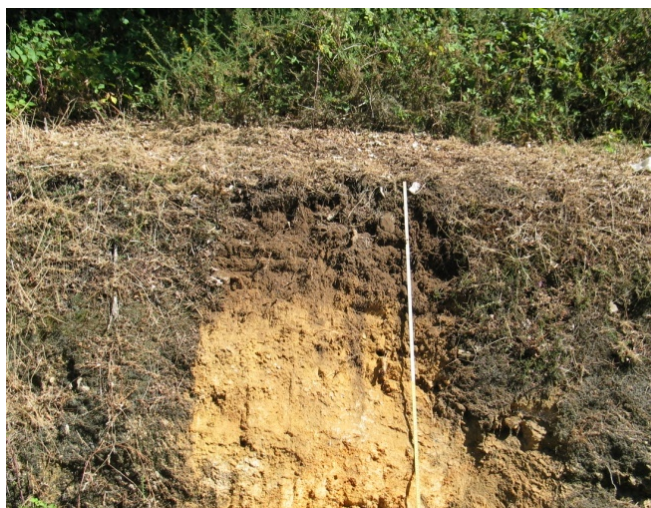


USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	46.2	franco	B	Arena	42.1	franco arcilloso
	Limo	30.9			Limo	30.5	
	Arcilla	23.0			Arcilla	27.5	

## 3.1.6.- Unidad de Lalín:

**1.- Información del lugar de la muestra:**

Nº perfil y denominación -----	<b>19 - BREIXA</b>
Fecha de observación -----	29-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0560903 4732220 coord. Geog: 42°44'24''N 8°15'21''W
Altitud -----	395 m
Posición fisiográfica -----	Ladera convexa
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Quercus robur.</i> ; gramíneas; uso forestal
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-muy húmedo

**2.- Información general acerca del suelo:**

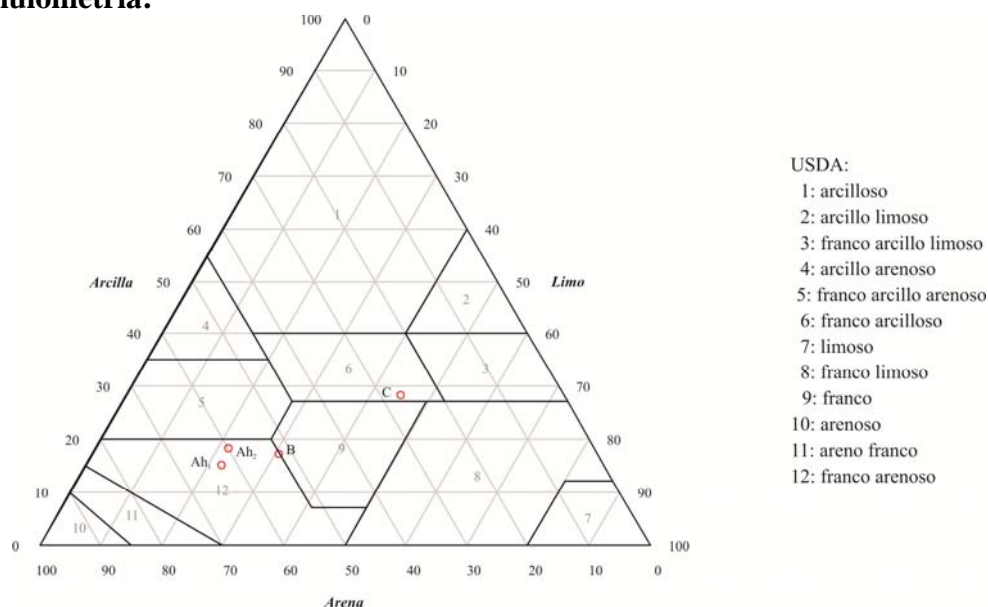
Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Ándico (húmico, alúmico, pachic, láxico, arénico) // Dystrudept Ándico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (más seco que capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 1
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de carretera comarcal de Breixa



## 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah <sub>1</sub>	0 – 20	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en seco; débil estructura migajosa fina; pedregosidad abundante; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes de raíces finas; límite gradual
Ah <sub>2</sub>	20 – 55	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/2 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes de raíces finas; límite neto
B	55 – 94	Pardo amarillento oscuro 10 YR 3/4 en húmedo y pardo amarillento 10 YR 5/6 en seco; débil estructura migajosa media; baja a moderada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta una pequeña cantidad de raíces finas; límite neto
C	> 94	Pardo amarillento oscuro 10 YR 4/6 en húmedo y amarillo parduzco 10 YR 6/8 en seco; débil estructura poliédrica fina; baja pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presenta una pequeña cantidad de raíces finas; límite neto

## 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural	Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ah <sub>1</sub>	Arena	62.5	franco arenoso	B	Arena	52.2	entre franco arenoso y franco
	Limo	22.4			Limo	30.7	
	Arcilla	15.1			Arcilla	17.1	
Ah <sub>2</sub>	Arena	59.9	franco arenoso	C	Arena	26.7	franco arcilloso
	Limo	21.9			Limo	45.1	
	Arcilla	18.2			Arcilla	28.2	

## 3.1.7.- Complejo de Rocas de Melide:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>20 – AGOLADA</b>
Fecha de observación -----	29-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0580525 4744476 coord. Geog: 42°50'55''N 8°00'52''W
Altitud -----	340 m
Posición fisiográfica -----	Bancal
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Cultivo con revegetación de pinar ( <i>Pinus radiata</i> ); <i>gramíneas</i>
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Cálido-muy húmedo

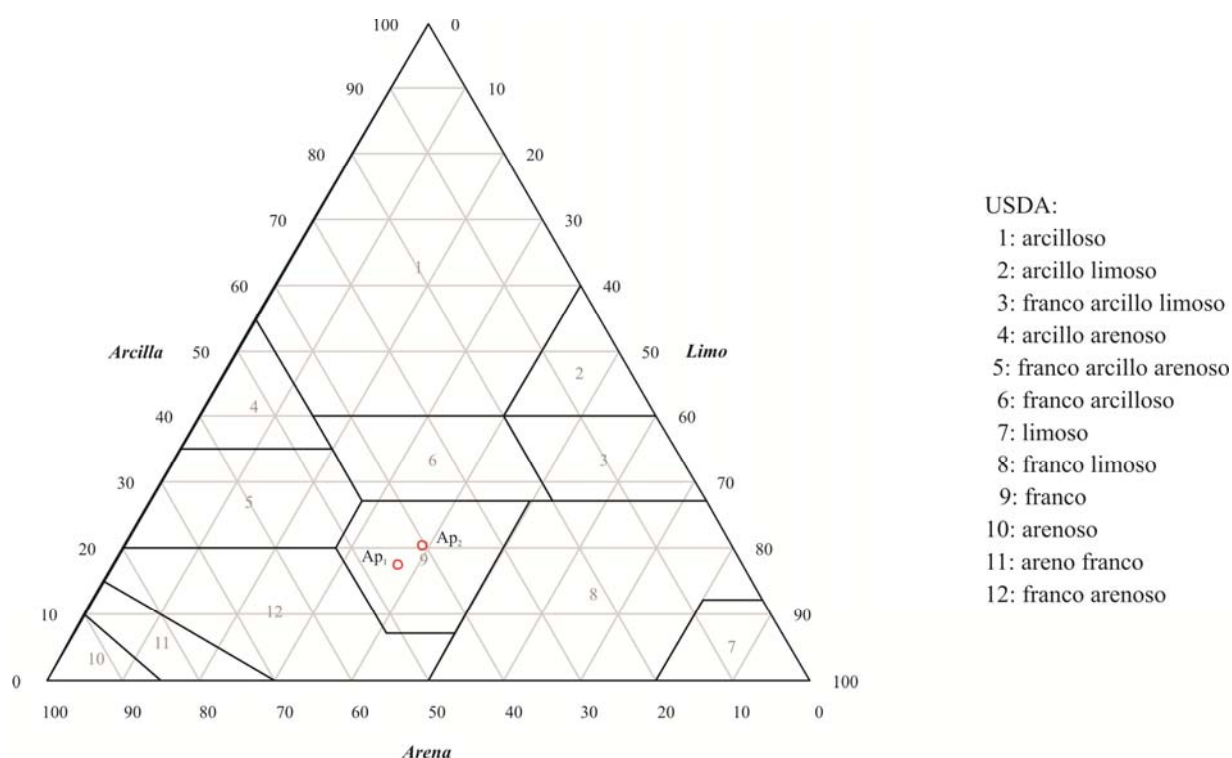
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Anfibolita
Clasificación del suelo -----	Umbrisol Háptico (húmico, alúmico, páchico) // Dystrudept Húmico Páchico
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (más seco que capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 0; no hay o muy pocas
Afloramientos rocosos -----	Clase 1
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución de pista parcelaria

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap <sub>1</sub>	0 – 35	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/3 en seco; débil estructura migajosa fina; baja pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes de raíces finas; límite difuso
Ap <sub>2</sub>	35 – 55	Pardo muy oscuro 7.5 YR 2.5/3 en húmedo y pardo 7.5 YR 4/4 en seco; débil estructura migajosa fina; escasa pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes de raíces finas; límite gradual

### 4.- Granulometría:



Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ap <sub>1</sub>	Arena	45.1	franco
	Limo	37.6	
	Arcilla	17.4	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ap <sub>2</sub>	Arena	40.4	franco
	Limo	39.3	
	Arcilla	20.3	



## PORTUGAL

### 3.1.8.- *Formación de Desejosa:*

- \* Perfil número 21: Adeganha
- \* Perfil número 22: Gouveia

### 3.1.9.- *Formación Cuarcítica:*

- \* Perfil número 23: Sendim da Serra

### 3.1.10.- *Complejo Alóctono Superior:*

- \* Perfil número 24: Morais I
- \* Perfil número 25: Morais II

### 3.1.11.- *Unidad de Morais-Talhinhas:*

- \* Perfil número 26: Limãos

### 3.1.12.- *Macizo de Bragança:*

- \* Perfil número 27: Bragança
- \* Perfil número 28: A Soeira



## 3.1.8.- Formación de Desejosa:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>21- ADEGANHA</b>
Fecha de observación -----	30-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0663412 4571179 coord. Geog: 41°16'32''N 7°02'56''W
Altitud -----	351 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Tomillo; Cistus spp.; troviscos; jara pringosa
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-muy seco

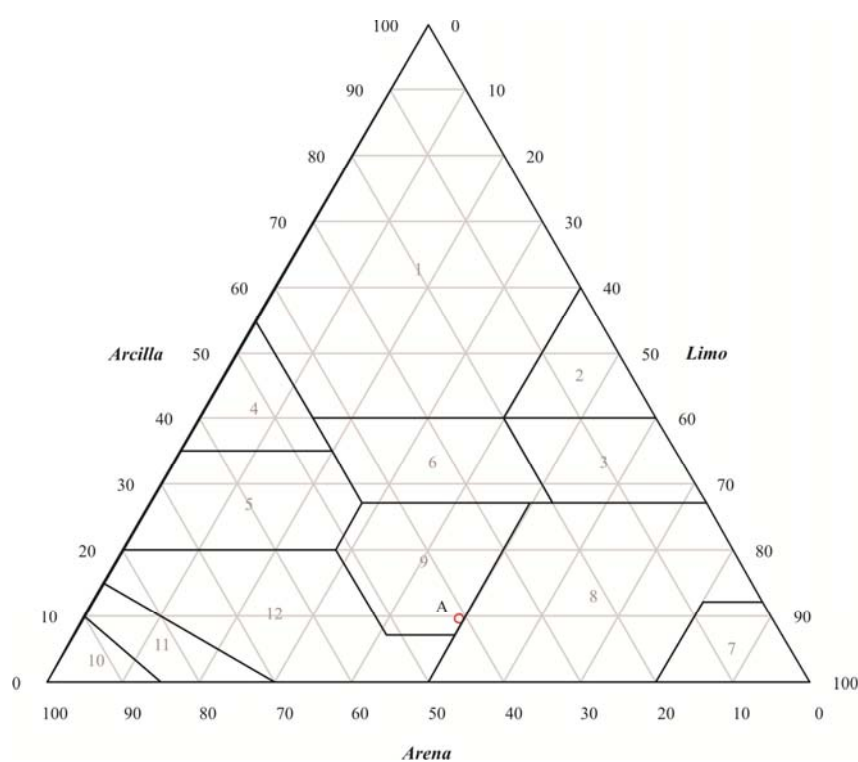
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Esquisto grauváquico
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de servicio

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 20	Pardo oscuro 10 YR 3/3 en húmedo y pardo amarillo 10 YR 5/4 en seco; débil estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	41.0	Franco
	Limo	49.6	
	Arcilla	9.5	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>22 – GOUVEIA</b>
Fecha de observación -----	30-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0666309 4572081 coord. Geog: 41°16'59''N 7°00'51''W
Altitud -----	457 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Sabinar, Cistus spp
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-muy seco

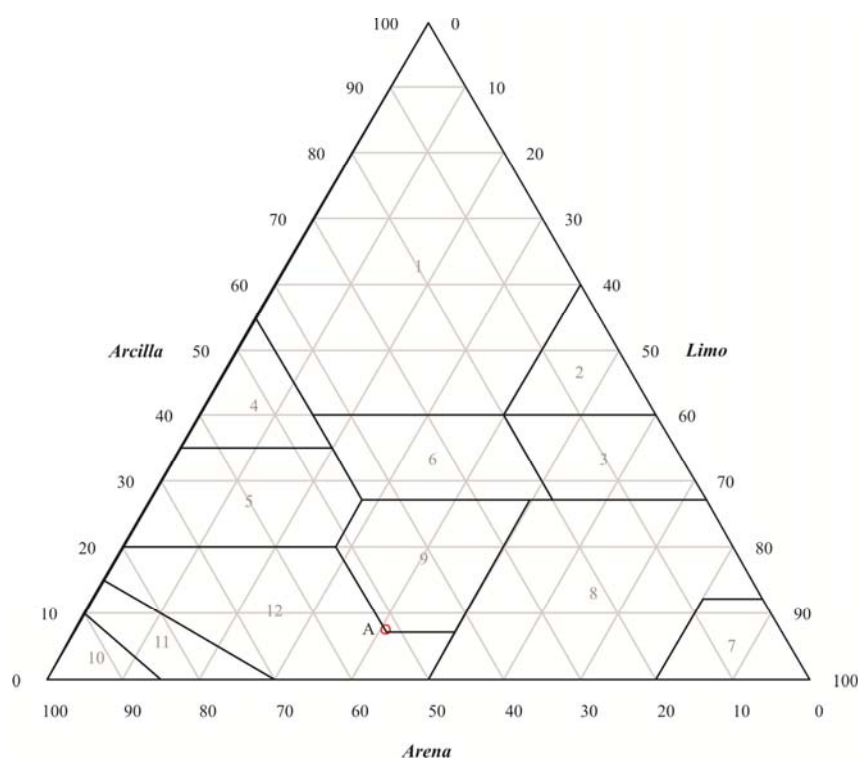
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Esquisto grauváquico
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de servicio

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – < 10	Pardo oscuro 10 YR 3/3 en húmedo y pardo 10 YR 5/3 (en seco; débil estructura migajosa fina; baja pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de abundantes raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



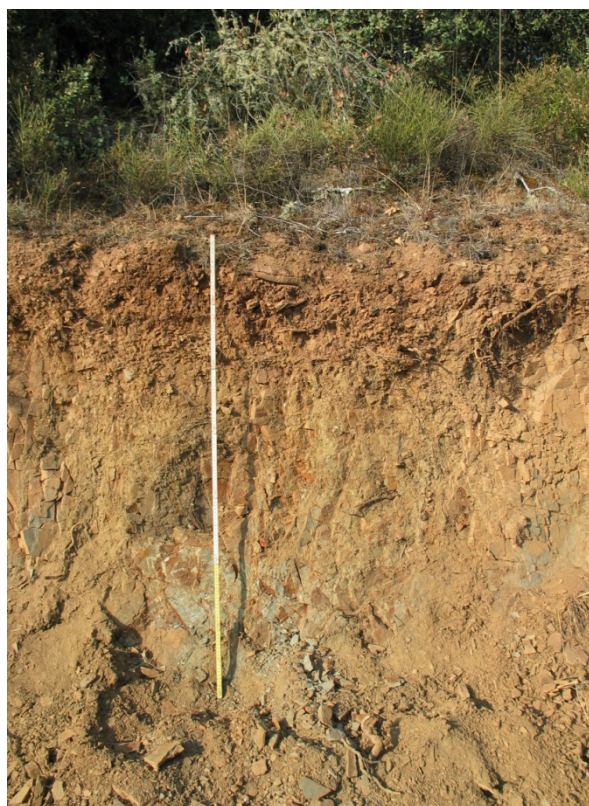
USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	51.8	entre franco y franco arenoso
	Limo	41.0	
	Arcilla	7.3	



## 3.1.9.- Formación Cuarcítica:



## 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>23- SENDÍM DA SERRA</b>
Fecha de observación -----	30-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0668685 4573491 coord. Geog: 41°17'43''N 6°59'07''W
Altitud -----	609 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Quercus rotundifolia</i> , <i>Cystus</i> spp., <i>Genista</i> spp.
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-seco

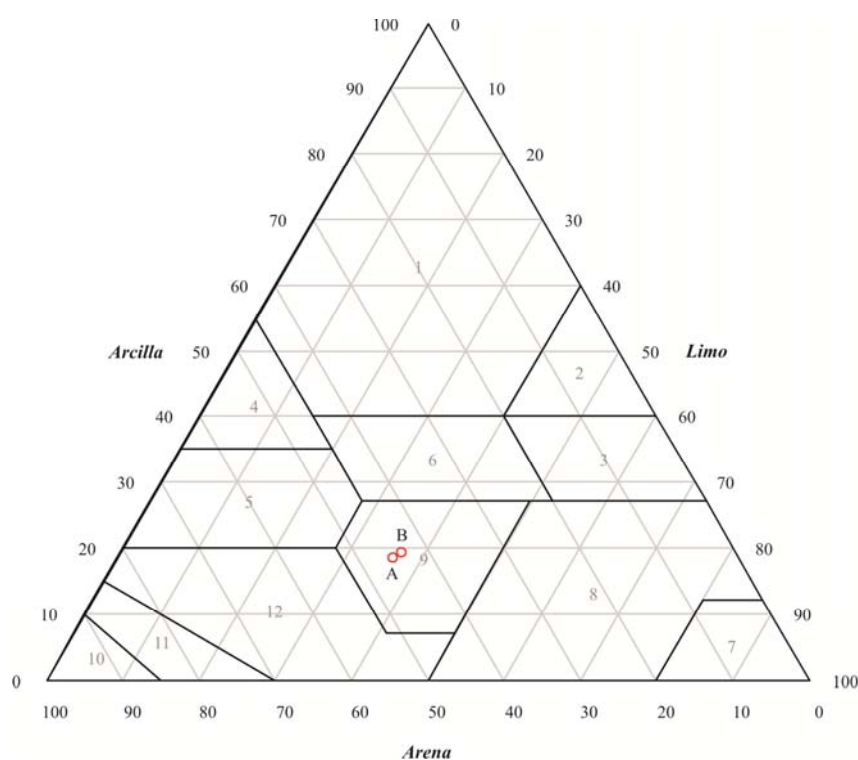
## 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Esquisto
Clasificación del suelo -----	<b>Cambisol Háplico // Haploxerept Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 3; moderadamente bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de servicio

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 20	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 5/6 en seco; estructura subangular media; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; firme en húmedo y duro a muy duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de escasas raíces finas; límite neto
B	20 – 60	Pardo oscuro 7.5 YR 3/2 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 4/6 en seco; débil estructura migajosa media a subangular media; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	45.4	franco
	Limo	36.3	
	Arcilla	18.3	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
B	Arena	43.8	franco
	Limo	37.0	
	Arcilla	19.3	



3.1.10.- *Complejo Alóctono Superior:***1.- Información del lugar de la muestra:**

Nº perfil y denominación -----	<b>24 – MORAIS I</b>
Fecha de observación -----	30-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0684057 4596030 coord. Geog: 41°29'41''N 6°47'42''W
Altitud -----	697 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Cultivo
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-seco

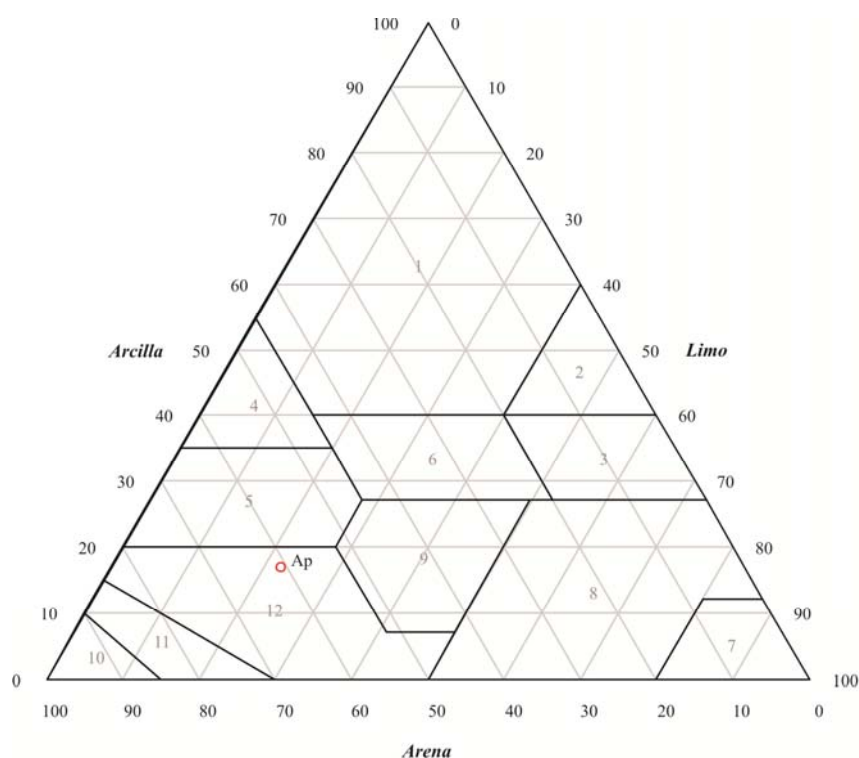
**2.- Información general acerca del suelo:**

Material de partida -----	Peridotita
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xeropsamment Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 2; pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Labores agrícolas

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0 – 20	Rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/3 en húmedo y rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/4 en seco; estructura migajosa; elevada pedregosidad incluyendo fragmentos del material de partida puesto que el laboreo alcanza la roca madre; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando a duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
Ap	Arena	60.8	franco arenoso
	Limo	22.4	
	Arcilla	16.8	



### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>25 – MORAIS II</b>
Fecha de observación -----	30-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0683431 4596331 coord. Geog: 41°29'51''N 6°48'09''W
Altitud -----	672 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 2; ligeramente inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Encinar con Jara, Erica spp. y Tomillo
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-seco

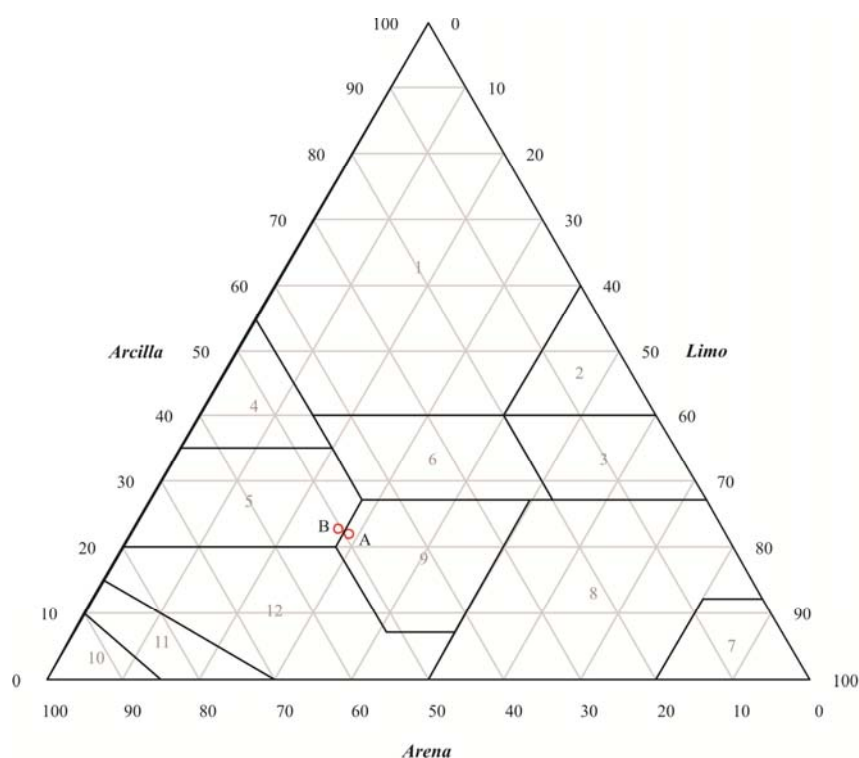
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Peridotita
Clasificación del suelo -----	<b>Cambisol Léptico(éutrico) // Haploxerept lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de servicio

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 20	Pardo rojizo oscuro 5 YR 2.5/2 en húmedo y pardo rojizo oscuro 5 YR 3/4 en seco; estructura migajosa media; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de escasas raíces finas; límite neto
B	20 – 40	Pardo rojizo oscuro 5 YR 3/3 en húmedo y pardo rojizo 5 YR 4/4 en seco; débil estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro a muy duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de muy escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	49.4	franco
	Limo	28.8	
	Arcilla	21.8	

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
B	Arena	50.2	franco arcillo arenoso
	Limo	27.1	
	Arcilla	22.7	



## 3.1.11.- Unidad de Morais-Talhinhas:

**1.- Información del lugar de la muestra:**

Nº perfil y denominación -----	<b>26 – LIMÃOS</b>
Fecha de observación -----	31-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0680451 4598935 coord. Geog: 41°31'18''N 6°50'14''W
Altitud -----	611 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 1; llano
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Jara pringosa, Erica spp. y Tomillo
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-seco

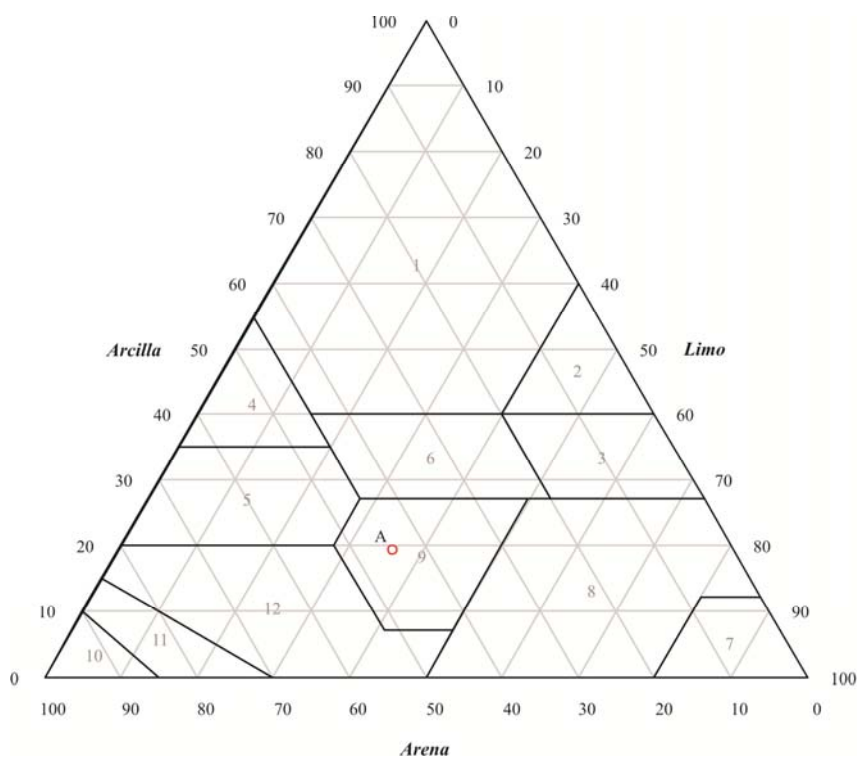
**2.- Información general acerca del suelo:**

Material de partida -----	Peridotita serpentizada
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Nula

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 10	Rojo muy oscuro 2.5 YR 2.5/3 en húmedo y rojo oscuro 2.5 YR 3/4 en seco; débil estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y blando en seco; presenta abundantes poros; presencia de muy escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	44.6	franco
	Limo	36.1	
	Arcilla	19.3	

3.1.12.- *Macizo de Bragança:***1.- Información del lugar de la muestra:**

Nº perfil y denominación -----	<b>27 – BRAGANÇA</b>
Fecha de observación -----	31-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0685806 4630848 coord. Geog: 41°48'28''N 6°45'48''W
Altitud -----	691 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	<i>Cistus ladanifer</i> , <i>Lavandula pedunculata</i> , <i>Genista</i> spp.
Clima(régimen ombrotérmico) -----	Templado-seco

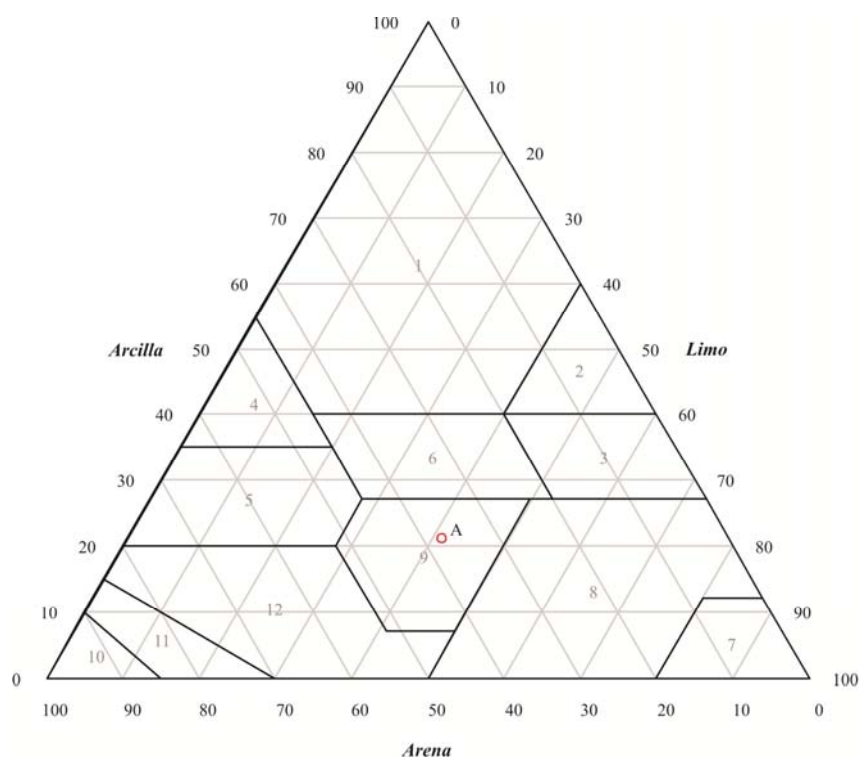
**2.- Información general acerca del suelo:**

Material de partida -----	Metaperidotita
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4, bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista de servicio forestal

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 10	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo 7.5 YR 5/4 en seco; débil estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; ligeramente plástico; firme en húmedo y duro a muy duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de muy escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	37.5	franco
	Limo	41.3	
	Arcilla	21.2	





### 1.- Información del lugar de la muestra:

Nº perfil y denominación -----	<b>28 – A SOEIRA</b>
Fecha de observación -----	31-08-2005
Ubicación -----	coord. UTM: 29 T 0667369 4633023 coord. Geog: 41°49'53''N 6°59'04''W
Altitud -----	725 m
Posición fisiográfica -----	Ladera
Forma del terreno circundante -----	Ondulado
Pendiente -----	Clase 3; inclinado
Vegetación y/o uso de la tierra -----	Castanea spp.; Jara pringosa; Erica spp.
Clima (régimen ombrotérmico) -----	Templado-subhúmedo

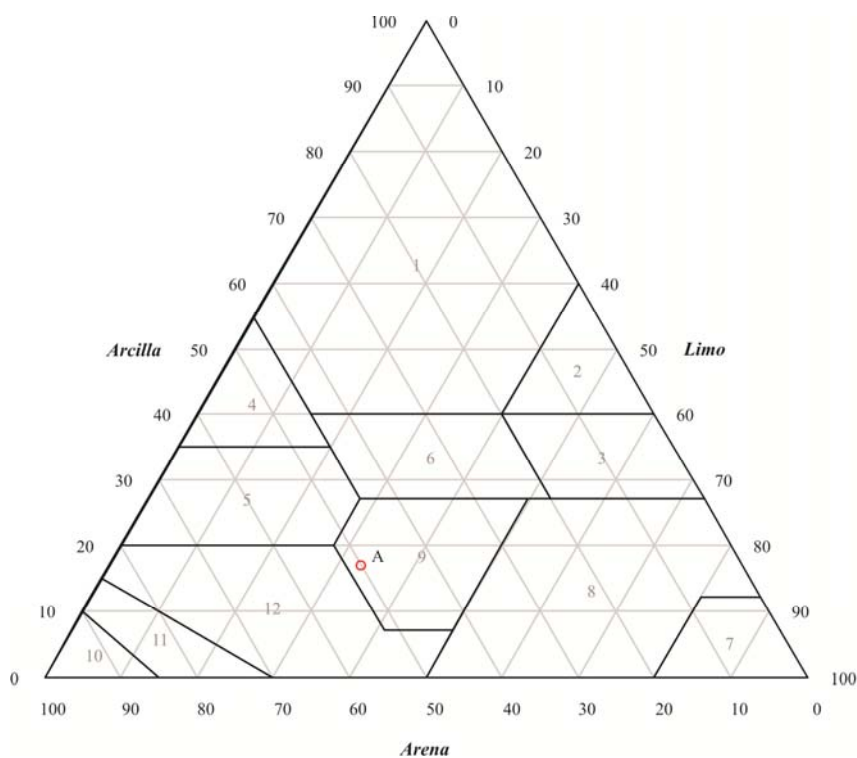
### 2.- Información general acerca del suelo:

Material de partida -----	Metaperidotita
Clasificación del suelo -----	<b>Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico</b>
Drenaje -----	Clase 4; bien drenado
Condiciones de humedad -----	Seco (inferior a capacidad de campo)
Pedregosidad -----	Clase 3; muy pedregoso
Afloramientos rocosos -----	Clase 0
Evidencias de erosión -----	No
Influencia humana -----	Ejecución pista servicio forestal

### 3.- Descripción de los horizontes:

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A	0 – 10	Pardo oscuro 7.5 YR 3/3 en húmedo y pardo fuerte 7.5 YR 4/6 en seco; estructura migajosa fina; elevada pedregosidad; ligeramente adherente; no plástico; friable en húmedo y duro en seco; presenta abundantes poros; presencia de muy escasas raíces finas; límite neto

### 4.- Granulometría:



USDA:

- 1: arcilloso
- 2: arcillo limoso
- 3: franco arcillo limoso
- 4: arcillo arenoso
- 5: franco arcillo arenoso
- 6: franco arcilloso
- 7: limoso
- 8: franco limoso
- 9: franco
- 10: arenoso
- 11: areno franco
- 12: franco arenoso

Horizonte	Fracción	%	Clase textural
A	Arena	50.1	franco
	Limo	33.2	
	Arcilla	16.7	



### 3.2. Caracterización de los Suelos Estudiados

En la Tabla 1 se encuentran representados los rangos y medias de los valores hallados en los suelos estudiados para las principales características fisicoquímicas, agrupados en función del tipo de material de partida y diferenciándolos, además, entre horizontes superficiales y subsuperficiales. La mayor parte de los suelos estudiados son de carácter ácido al presentar un rango de valores bajos de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , entre 4,2, en el horizonte B del perfil desarrollado sobre gneis (Península de Masanteo), y 5,8, correspondientes a los perfiles desarrollados a partir de gabros (horizonte C de Val do Dubra) y esquistos (horizonte A de Sandim da Serra). Sin embargo, los valores más elevados de pH se han encontrado en los horizontes de los suelos desarrollados a partir de rocas serpentínicas, con valores que oscilan entre 5,5 y 7,3, para horizontes superficiales, y entre 5,2 y 7,0, para horizontes subsuperficiales. Aunque no se han encontrado diferencias significativas ( $P < 0,05$ , prueba de paridad t) en los valores de  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  entre horizontes superficiales y subsuperficiales del conjunto de perfiles, si se han encontrado diferencias significativas ( $P < 0,01$ ) entre los valores de pH cuantificados para los horizontes de los suelos sobre serpentina, tanto superficiales como subsuperficiales, y el conjunto restante de perfiles. Estas diferencias de pH se deben a las diferencias composicionales del material de partida, con presencia, en rocas serpentínicas, de minerales ricos en  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ .

Las bajas cantidades de C orgánico halladas en los suelos desarrollados a partir de materiales serpentínicos (horizontes superficiales: 2,7 %; horizontes subsuperficiales: 1,0 %; Tabla 1), junto con la ausencia de material amorfo (ver epígrafe mineralogía), debido principalmente a la escasez de precipitaciones en muchos casos, fuente fundamental del agua necesaria para las reacciones de hidrólisis en el proceso de meteorización de las rocas, hace que estos perfiles presenten una Capacidad de Intercambio de Cationes (CIC) significativamente ( $P < 0,05$ ) inferior a los restantes grupos de suelos (horizontes superficiales: 6,7  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ; horizontes subsuperficiales: 7,0  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ; Tabla 1), y un tanto por cien de saturación en bases de cambio (V) con valores significativamente ( $P < 0,01$ ) más elevados (horizontes superficiales: 64,3 %; horizontes subsuperficiales: 76,1 %, respectivamente; Tabla 1), como consecuencia de las altas concentraciones de  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$  de cambio. El grupo de suelos desarrollados sobre esquistos presentan valores de CIC y V muy similares a los observados para el caso de las serpentinas (horizontes superficiales: 3,2  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$  y 64,9 %; horizontes subsuperficiales: 3,2  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$  y 56,5 %; Tabla 1). Esto se debe, al igual que en los suelos serpentínicos, a la escasez de C orgánico (horizontes superficiales: 1,2 %; horizontes subsuperficiales: 0,4 %, respectivamente; Tabla 1) y material amorfo, dado que se corresponden con suelos desarrollados bajo un régimen ombrotérmico entre templado-seco a templado-muy seco, lo que dificulta, por un lado, el correcto establecimiento de la vegetación, de ahí los valores bajos de C orgánico, y, por otro, la meteorización del material de partida, impidiendo la formación de material amorfo, y el lavado de los elementos libreados durante las escasas reacciones de hidrólisis llevadas a cabo durante los procesos de meteorización, lo que da lugar a que los valores de V sean tan elevados (horizontes superficiales: 64,9 %; horizontes subsuperficiales: 56,5 %, respectivamente; Tabla 1). Se ha de notar que en suelos sobre granulitas se presentan valores altos de V de hasta el 40,6 % (Tabla 1), que corresponden con los valores observados para el horizonte  $\text{Ap}_1$  del perfil de Forte Vello (Tabla 9, Anexo 3). Estos valores tan elevados se deben a los procesos de encalado y/o fertilización llevados a cabo para mantener la producción en los suelos destinados a la agricultura.

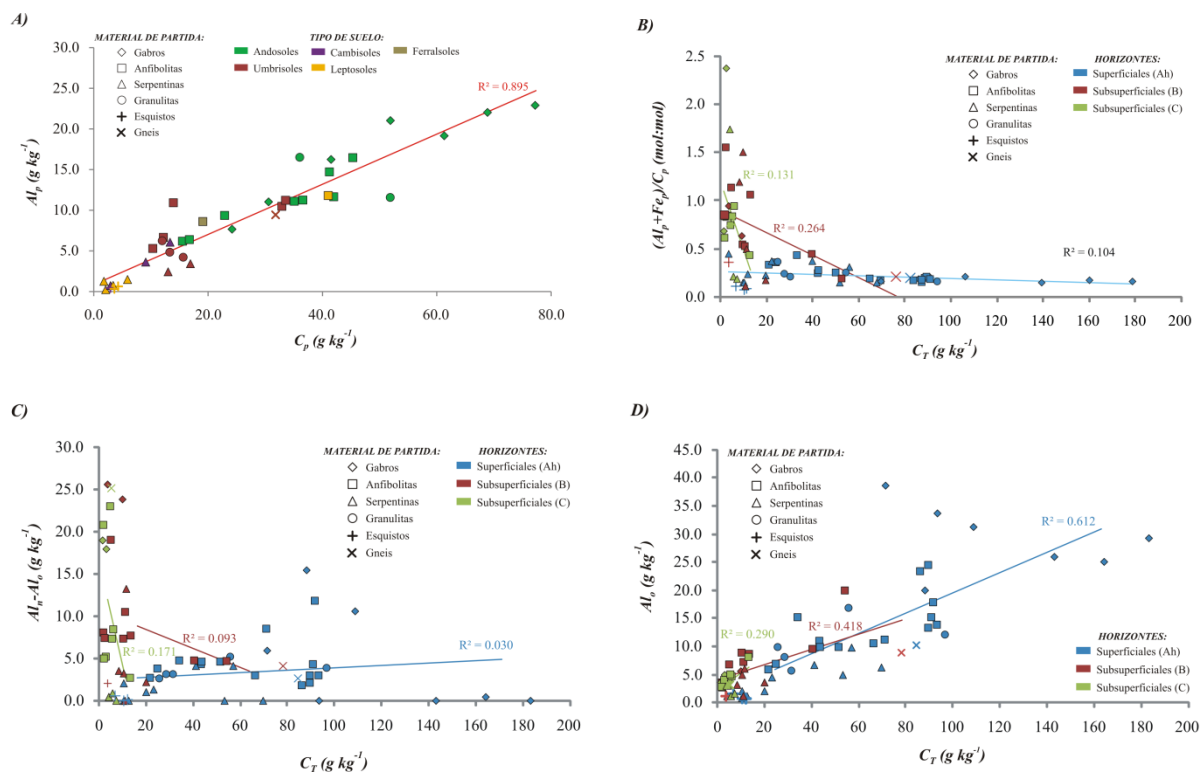
<sup>†</sup> CIC: Capacidad de Intercambio de Cationes  
<sup>‡</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=extracción con KCl; Al<sub>10</sub>, Fe<sub>10</sub>, Si<sub>10</sub>=extracción con pirofosfato sódico; Al<sub>0</sub>, Fe<sub>0</sub>, Si<sub>0</sub>=extracción con ditionito-citrato; Al<sub>15</sub>, Si<sub>15</sub>=extracción con NaOH.

MATERIAL DE PARTIDA	Ident.	pH <sub>iso</sub>	pH <sub>iso</sub>	pH <sub>iso</sub>			CIC <sup>†</sup>	V	C <sub>r</sub>	C <sub>p</sub>	N <sub>r</sub>	C/N	HORIZONTES SUPERFICIALES (n=40)										Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>e</sub>	Si <sub>p</sub>	Si <sub>e</sub>	Al <sub>i</sub> /Al <sub>e</sub>	Alófano									
				2'	30'	2h							mol·mol	Al <sub>i</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>i</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>i</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>i</sub>	Al <sub>p</sub>	Fe <sub>p</sub>							Fe <sub>e</sub>	Si <sub>p</sub>	Si <sub>e</sub>	Al <sub>i</sub>	Al <sub>p</sub>	Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>e</sub>	g kg <sup>-1</sup>	%
HORIZONTES SUPERFICIALES (n=40)																																					
GABRO (n=7)	Max	5.2	4.9	11.9	12.0	12.1	22.8	6.7	18.3	77.2	1.5	16.4	2.4	23.0	38.6	39.0	44.5	8.1	12.6	67.3	1.5	13.4	14.7	0.6	3.4												
	Min	4.4	4.0	11.3	11.3	11.4	12.0	1.4	7.1	24.2	0.6	12.9	0.1	7.7	20.0	20.2	24.7	2.0	8.6	34.8	1.0	2.1	4.6	0.4	0.5												
	Med	4.9	4.4	11.6	11.7	11.9	16.5	3.2	12.2	50.8	1.0	14.3	1.1	17.2	29.1	31.4	33.1	5.2	11.1	54.1	1.3	5.3	7.5	0.6	1.4												
ANFIBOLITA (n=15)	Max	5.4	4.9	11.6	11.8	11.9	16.7	19.6	9.3	45.3	0.8	17.4	2.4	16.5	24.5	34.6	29.6	13.1	18.7	77.2	1.7	5.7	9.5	0.9	1.4												
	Min	4.3	3.9	9.2	9.3	9.4	6.0	1.4	2.5	10.4	0.2	12.2	0.4	5.3	5.9	7.9	8.6	3.9	3.3	12.3	1.2	0.7	1.8	0.7	0.3												
	Med	4.9	4.2	10.8	11.0	11.2	10.5	7.5	6.5	27.9	0.5	14.6	1.4	10.2	13.2	17.0	17.7	7.1	10.7	42.9	1.5	2.3	5.2	0.8	0.9												
SERPENTINA (n=9)	Max	7.3	6.4	9.8	11.0	10.3	8.8	87.7	7.0	17.0	0.6	30.7	0.7	6.1	6.7	13.9	10.7	10.5	19.1	103.1	1.7	1.2	5.3	0.9	0.3												
	Min	5.5	4.4	8.5	8.5	8.7	4.4	24.4	0.4	1.8	0.0	12.4	0.0	0.2	1.0	1.3	0.4	1.0	3.2	31.3	0.9	0.4	1.7	0.2	0.1												
	Med	6.1	5.1	9.0	9.2	9.2	6.7	64.3	2.7	7.7	0.2	18.9	0.1	2.2	3.3	5.9	4.2	3.9	8.7	55.1	1.3	0.8	3.0	0.7	0.2												
GRANULITA (n=5)	Max	5.5	4.5	11.7	11.6	12.0	11.4	40.6	9.7	51.9	0.7	15.8	2.9	16.6	16.9	23.8	22.0	14.8	20.8	64.3	1.6	1.5	6.0	1.0	0.3												
	Min	4.5	3.8	9.3	9.6	9.7	9.0	1.7	2.6	12.1	0.3	11.6	0.3	4.2	5.8	10.3	8.9	5.1	9.2	25.5	1.1	0.4	0.2	0.7	0.3												
	Med	4.9	4.1	10.2	10.3	10.6	9.9	12.5	4.8	25.8	0.4	13.3	1.6	8.7	10.5	15.4	14.1	8.3	17.1	46.4	1.4	1.1	3.7	0.8	0.3												
ESQUISTO (n=3)	Max	5.8	5.1	8.5	8.6	8.7	3.9	83.7	1.4	4.3	0.1	15.2	0.3	0.6	1.7	2.7	2.2	0.6	5.1	38.3	1.2	0.2	1.8	0.3	0.0												
	Min	5.0	3.9	8.1	8.1	8.1	2.4	34.9	0.8	3.0	0.1	13.3	0.0	0.3	0.7	1.1	0.6	0.5	1.8	12.6	1.0	0.1	0.1	0.5	0.0												
	Med	5.4	4.5	8.2	8.3	8.4	3.2	64.9	1.2	3.6	0.1	14.3	0.1	0.4	1.1	1.7	1.2	0.6	2.9	21.8	1.1	0.2	0.7	0.4	0.0												
GNEIS (n=1)	Max	4.4	3.8	10.3	10.4	10.6	14.2	4.4	8.5	31.8	0.7	13.4	3.1	9.5	10.4	10.5	13.0	9.5	14.9	18.1	1.4	1.4	2.4	0.9	-												
	Min	4.4	3.8	10.3	10.4	10.6	14.2	4.4	8.5	31.8	0.7	13.4	3.1	9.5	10.4	10.5	13.0	9.5	14.9	18.1	1.4	1.4	2.4	0.9	-												
	Med	4.4	3.8	10.3	10.4	10.6	14.2	4.4	8.5	31.8	0.7	13.4	3.1	9.5	10.4	10.5	13.0	9.5	14.9	18.1	1.4	1.4	2.4	0.9	-												
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES (n=30)																																					
GABRO (n=4)	Max	5.8	5.0	9.7	9.9	10.3	7.2	52.9	1.0	4.4	0.1	25.9	5.1	4.8	5.6	12.6	29.6	3.0	8.2	70.9	1.6	1.1	11.0	-	-												
	Min	5.0	3.7	9.2	9.5	9.7	4.0	14.7	0.2	1.0	0.0	2.4	0.0	2.4	3.5	7.6	22.5	1.7	2.5	39.7	1.1	0.5	7.2	-	-												
	Med	5.2	4.2	9.5	9.7	10.0	5.6	25.4	0.5	2.4	0.1	11.6	1.8	3.8	4.5	10.5	26.1	2.1	4.5	61.9	1.4	0.8	9.1	-	-												
ANFIBOLITA (n=16)	Max	5.9	4.3	11.7	11.5	11.8	8.5	50.4	5.4	27.1	0.4	32.7	5.8	10.8	20.0	23.3	27.1	14.1	21.6	84.1	1.8	4.7	21.8	-	-												
	Min	4.3	3.7	8.8	8.9	9.0	2.0	2.3	0.2	1.5	0.0	3.8	0.2	2.2	2.7	4.1	7.7	1.4	1.3	24.8	1.1	0.4	2.8	-	-												
	Med	5.0	4.0	9.7	9.8	10.1	5.2	9.4	1.2	6.6	0.1	16.1	1.4	5.4	6.6	10.2	16.3	5.1	7.2	46.7	1.5	1.0	7.1	-	-												
SERPENTINA (n=7)	Max	7.0	5.9	9.4	9.4	9.6	10.1	92.6	2.0	8.1	0.2	47.0	0.2	5.0	5.1	11.8	8.3	16.1	16.4	128.1	2.0	1.9	8.1	-	-												
	Min	5.2	4.2	8.3	8.6	8.5	4.1	26.5	0.4	1.9	0.0	11.7	0.0	0.3	1.1	2.4	1.0	0.8	2.6	29.3	0.7	0.4	0.0	-	-												
	Med	6.2	5.1	8.8	8.9	9.0	7.0	76.1	1.0	3.6	0.1	21.3	0.1	1.9	2.7	7.3	4.1	6.6	7.1	63.2	1.4	1.0	3.1	-	-												
ESQUISTO (n=1)	Max	5.3	4.4	8.6	8.9	8.9	3.2	56.5	0.4	2.2	0.0	18.8	0.1	1.2	1.3	1.6	3.3	1.2	3.3	38.0	1.3	0.2	2.3	-	-												
	Min	5.3	4.4	8.6	8.9	8.9	3.2	56.5	0.4	2.2	0.0	18.8	0.1	1.2	1.3	1.6	3.3	1.2	3.3	38.0	1.3	0.2	2.3	-	-												
	Med	5.3	4.4	8.6	8.9	8.9	3.2	56.5	0.4	2.2	0.0	18.8	0.1	1.2	1.3	1.6	3.3	1.2	3.3	38.0	1.3	0.2	2.3	-	-												
GNEIS (n=2)	Max	4.8	3.9	9.9	9.9	10.0	12.7	5.1	7.8	29.9	0.7	17.1	3.5	8.7	9.0	9.2	28.3	11.0	16.3	36.8	1.5	1.1	3.5	-	-												
	Min	4.2	3.7	9.0	9.2	9.3	4.1	3.6	0.5	2.5	0.0	13.4	0.7	3.1	3.2	3.5	13.1	2.8	3.3	28.4	1.3	0.6	2.0	-	-												
	Med	4.5	3.8	9.5	9.5	9.7	8.4	4.4	4.2	16.2	0.7	15.2	2.1	5.0	6.1	6.2	20.7	6.0	0.9	28.4	1.3	0.8	2.9	-	-												

El comportamiento del  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  es muy similar al del  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , con valores medios bajos en la mayor parte de los perfiles, lo que es característico de los suelos localizados en el área de estudio, y un poco más elevados en el caso de los perfiles serpentínicos (5,1 para horizontes superficiales y subsuperficiales, Tabla 1), aunque no existen diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre ambos grupos. Por otra parte, valores obtenidos mediante el test de NaF (Fielles y Perrot, 1966) son significativamente más altos ( $P < 0,01$ ) en los perfiles derivados de gabros (valores medios de 11,9 para horizontes superficiales y 10,0 para subsuperficiales, Tabla 1) y anfíbolita (valores medios de 11,2 para horizontes superficiales y 10,1 para subsuperficiales, Tabla 1) en comparación con los restantes grupos, lo que indica una mayor abundancia de formas de Al activo en estos suelos.

Los resultados de las extracciones químicas selectivas de Fe y Al muestran valores de  $\text{Al}_\text{p}$  (extraído con pirofosfato sódico) significativamente mayores ( $P < 0,01$ ) que los obtenidos para  $\text{Fe}_\text{p}$ , en todos los casos, tanto para horizontes superficiales como para los horizontes subsuperficiales (Tabla 1). Estos bajos valores de  $\text{Fe}_\text{p}$  en comparación con los de  $\text{Al}_\text{p}$  están probablemente relacionados con la mayor estabilidad que presenta el Fe en compuestos inorgánicos respecto a complejos orgánicos (Wada y Higashi, 1976). Por otra parte, los valores medios obtenidos para el  $\text{Fe}_\text{d}$  (extraído con ditionito-citrato) son significativamente mayores ( $P < 0,01$ ) que los obtenidos para el  $\text{Fe}_\text{p}$  y el  $\text{Fe}_\text{o}$  (extraído con oxalato ácido), independientemente del material de partida originario y de si se corresponden con horizontes superficiales o subsuperficiales (Tabla 1). Estas diferencias indican que el Fe se encuentra, principalmente, formando parte de oxihidróxidos cristalinos más que como constituyente de complejos con la materia orgánica del suelo.

Los valores relativamente altos de la relación  $\text{Al}_\text{p}/\text{Al}_\text{o}$  (Tabla 1), junto con los niveles bajos de  $\text{Si}_\text{o}$ , tanto en horizontes superficiales como subsuperficiales, salvo en el horizonte  $\text{Ah}_2$  de Val do Dubra que muestra valores incluso más elevados ( $13,4 \text{ g kg}^{-1}$ , Tabla 7, Anexo 1), aunque quizás sobrevalorados por la presencia de fitolitos derivados de la vegetación de la zona (ver epígrafe descriptiva de perfiles), sugieren que el alofano y la imogolita están presentes en pequeñas cantidades. Este hecho se confirma por el hecho de que el contenido en alofano, en aquellos horizontes en los que la relación molar  $(\text{Al}_\text{o}-\text{Al}_\text{p})/\text{Si}_\text{o}$  está próximo a 2, estimado de acuerdo con el método propuesto por Parfitt y Henni (1982), es menor del 5 % y en muy pocas ocasiones sobrepasa el 1 % (Tabla 1). Estos datos concuerdan con los hallados por Camps Arbestain y col. (2001) en un estudio sobre suelos ándicos no volcánicos presentes en Galicia. Por lo tanto, los resultados obtenidos muestran que existe un claro predominio de los complejos Al-humus sobre el alofano en todos los horizontes estudiados. De acuerdo con Shoji y Fujiwara (1984), el alofano y la imogolita se forman preferentemente a valores de pH superiores a 4,9, lo que concuerda con la mayor parte de los datos obtenidos (Tabla 1). En condiciones de mayor acidez, la complejación del Al por la materia orgánica del suelo ejerce un papel antialofánico, dado que imposibilita la reacción de éste con el Si para dar lugar al alofano o a la imogolita. Este predominio de formas complejadas de Al con la materia orgánica del suelo, sobre todo en aquellos suelos con elevados contenidos en carbono orgánico, desarrollados principalmente a partir de gabros (7,1-18,3 %) y anfíbolitas (2,2-9,3 %) (Tabla 1), puede ser considerado como uno de los factores que proporciona a la fracción húmica un cierto grado de protección frente a la degradación (Higashi, 1983). Este hecho se confirma por la buena correlación positiva observada entre  $\text{Al}_\text{p}$  y el  $\text{C}_\text{p}$  (Fig. 1 A), significativamente mayor ( $P < 0,01$ ) en suelos gabroicos y anfíbolíticos que en los restantes grupos.



**Figura 1.-** Relaciones entre las distintas formas de Al y Fe con respecto a las distintas fracciones de Carbono: A)  $Al_p$  vs.  $C_p$  (solamente para horizontes superficiales); B)  $(Al_p + Fe_p)/C_p$  vs.  $C$  orgánico; C)  $Al_n - Al_o$  vs.  $C$  orgánico (los valores negativos fueron considerados como 0); D)  $Al_o$  vs.  $C$  orgánico.

La capacidad de la materia orgánica para complejar metales fue determinada mediante el cálculo de la relación molar  $(Al_p + Fe_p)/C_p$ . De acuerdo con Dahlgren y col. (1993) esta relación molar oscila entre 0,1 y 0,2 cuando la capacidad complejante de la materia orgánica está saturada, como es el caso de la mayor parte de los horizontes superficiales estudiados (Fig. 1 B). Sin embargo, esta relación molar presenta valores muy elevados en los horizontes subsuperficiales, si los comparamos con los superficiales, llegando a alcanzar valores de 2,3, correspondiente al horizonte C del perfil de Val do Dubra (Fig. 1 B; Tabla 8, Anexo 2). La gran variación que sufre la relación  $(Al_p + Fe_p)/C_p$  en los horizontes subsuperficiales puede estar estrechamente relacionada con la capacidad del pirofosfato sódico para extraer Al interlamilar y algunas formas inorgánicas de Fe y Al relativamente lábiles (Page y De Kimpe, 1989; Soon, 1993; Paterson y col., 1993), además de formas amorfas de hidróxidos de Al e incluso gibbsita cristalina (Kaiser y Zech, 1996), lo que invalida completamente el intento de caracterización del estado de complejación de la materia orgánica por este procedimiento.

Se cuantificaron cantidades relativamente similares de  $Al_n$  (extraído con NaOH) y  $Al_o$  en la mayor parte de los horizontes ricos en  $C$  orgánico (Tabla 1), lo que indica la escasa presencia de otros componentes ricos en Al que pudieran ser susceptibles de ser disueltos por NaOH. Sin embargo, cuatro de estos horizontes (gabbros: Ah<sub>1</sub> Val do Dubra, A Fonte de Pena Cabaleira; anfibolitas: Ah<sub>2</sub> Xinzo, Ah<sub>1</sub> Breixa) presentan un  $Al_n - Al_o$  con valores por encima de 8 g kg<sup>-1</sup> (Fig. 1 C; Tabla 8, Anexo 2), que se corresponden, más concretamente, con aquellos horizontes en los que se ha detectado, mediante difracción de Rayos X (RX), cantidades significativas

de gibbsita, tal y como se verá más adelante. Por otra parte, en los horizontes subsuperficiales el  $A_n$ - $Al_o$  presenta valores significativamente más elevados ( $P < 0,01$ ) que en los horizontes superficiales, lo que se puede atribuir a un incremento con la profundidad de hidróxidos de Al de bajo grado de orden, tal y como lo indican los valores relativamente altos de la relación molar  $(Al_n-Al_o)/(Si_n-Si_o)$  (Tabla 8, Anexo 2).

A medida que aumenta el contenido en materia orgánica del suelo la diferencia entre  $Al_n$  y  $Al_o$  sufre un descenso significativo ( $P < 0,01$ ), tal y como se aprecia en la Fig. 1 C, mientras que el contenido en  $Al_o$  aumenta significativamente ( $P < 0,01$ ) en los horizontes superficiales en comparación con los superficiales (Fig. 1 D). La buena correlación entre la fracción  $Al_o$  y el C orgánico (Fig. 1 D) pone de manifiesto la afinidad de los componentes minerales amorfos por la materia orgánica del suelo, sobre todo en los horizontes superficiales de los suelos desarrollados a partir de gabros (Fig. 1 D), en los que tanto la cantidad de componentes amorfos (ver epígrafe de mineralogía) como los contenidos en  $Al_o$  y C orgánico (Tabla 1) son significativamente más elevados ( $P < 0,01$ ) que los correspondientes a los restantes grupos de suelos. Esto se confirma con el hecho de que la relación  $Al_p/Al_o$  tiende a descender a medida que el contenido en C orgánico aumenta (Tabla 1), caso de los suelos desarrollados a partir de materiales gabroicos en los que la relación presenta un valor medio de 0,6. En suelos sobre esquisto los valores medios de la relación son incluso inferiores (media de 0,4) (Tabla 1) a los obtenidos para los gabros, lo que se debe probablemente al escaso número de horizontes que integran este grupo de suelos. De todas formas estos valores de la relación  $Al_p/Al_o$  son puramente orientativos dado que, tal y como se ha visto en la Fig. 1 B, el pirofosfato sódico es un extractante poco específico y esta relación no puede ser utilizada para diferenciar entre las fracciones de Al orgánica e inorgánica.

### 3.3. Fraccionamiento de las formas de Carbono

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en la especiación de las formas de carbono así como las contribuciones porcentuales de cada una de ellas al total de C total presente en cada horizonte. Las determinaciones solamente se han realizado para los horizontes superficiales de cada perfil (horizontes A), puesto que es en ellos donde se acumula la mayor parte del C orgánico. La cuantificación de las fracciones de C en función de su grado de oxidabilidad se han determinado de la siguiente forma:

- I. **C No oxidable (C No ox.):** diferencia entre el C total ( $C_T$ ) y el C oxidable por dicromato potásico en caliente ( $C_{DC}$ ).
- II. **C difícilmente oxidable (C dif. Ox.):** diferencia entre el C oxidable por dicromato potásico en caliente ( $C_{DC}$ ) y el C oxidable por dicromato potásico en frío ( $C_{DF}$ ).
- III. **C oxidable (C ox.):** diferencia entre el C oxidable por dicromato potásico en frío ( $C_{DF}$ ) y el C oxidable por permanganato potásico 200 mM ( $C_{P200mM}$ ).
- IV. **C fácilmente oxidable (C fácil):** diferencia entre el C oxidable por permanganato potásico 200 mM ( $C_{P200mM}$ ) y el C oxidable por permanganato potásico 33 mM ( $C_{P33mM}$ ).
- V. **C muy oxidable (C muy ox.):** C oxidable por permanganato potásico 33 mM ( $C_{P33mM}$ ).



Tal y como era de esperar, las muestras con un mayor contenido en C total son aquellas que presentan una mayor contribución de cada una de las formas de C cuantificadas (Tabla 2). Así, los horizontes superficiales de suelos desarrollados sobre gabros (Fig. 2 A) presentan porcentajes significativamente ( $P < 0,01$ ) más elevados de las cinco fracciones de C cuantificadas (*C No ox.*: 0,76-5,56 %; *C dif. ox.*: 2,98-8,02 %; *C ox.*: 0,61-4,48 %; *C fácil. ox.*: 0,40-1,29 %; *C muy ox.*: 0,32-1,11 %) que los horizontes correspondientes a los restantes materiales de partida (Tabla 2).

**Tabla 2.-** Contenidos en C obtenidos mediante varios métodos oxidativos y resultados de cuantificación de cada una de las formas de C en las que se divide el C total.

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H.	C <sub>T</sub>	C <sub>p</sub>	C <sub>DC</sub>	C <sub>DF</sub>	C <sub>P200mM</sub>	C <sub>P33mM</sub>	C No ox.	C dif. ox.	C ox.	C fácil. ox.	C muy ox.	Arena	Limo	Arcilla
%									%					%		
GABRO (n=7)	Val do Dubra	Ah1	8.82	3.06	7.53	1.68	1.07	0.42	1.29	5.85	0.61	0.65	0.42	59.8	26.1	14.1
		Ah2	7.15	2.42	6.36	3.38	0.73	0.32	0.79	2.98	2.65	0.40	0.32	55.8	34.4	9.8
	F. P. Cabaleira	A	10.90	5.19	6.93	2.52	0.89	0.39	3.97	4.41	1.63	0.50	0.39	42.8	33.2	24.0
		Ah1	18.29	7.72	13.88	5.85	2.40	1.11	4.41	8.02	3.45	1.29	1.11	56.3	29.6	14.1
	L. P. Cabaleira	Ah2	16.40	6.89	12.20	6.63	2.15	0.92	4.20	5.57	4.48	1.23	0.92	63.7	23.1	13.2
		Ah3	14.29	6.13	8.73	3.72	1.42	0.61	5.56	5.01	2.30	0.81	0.61	62.2	25.0	12.8
		Ah4	9.32	4.15	7.73	2.98	1.32	0.60	1.60	4.74	1.66	0.73	0.60	64.7	23.6	11.7
ANFIBOLITA (n=15)	E. Mera I	Ah1	4.33	1.56	4.20	2.22	0.45	0.27	0.13	1.98	1.77	0.19	0.27	61.1	20.1	18.8
		Ah2	5.15	1.68	4.68	3.54	0.56	0.26	0.47	1.14	2.98	0.30	0.26	63.0	17.7	19.3
		Ah3	5.73	2.31	3.42	2.55	0.64	0.30	2.31	0.87	1.91	0.34	0.30	58.0	19.8	22.2
	E. Mera II	A	4.36	1.91	3.84	2.55	0.47	0.31	0.52	1.29	2.08	0.16	0.31	68.4	14.3	17.3
		Ah1	9.08	4.12	6.76	6.54	0.95	0.42	2.32	0.22	5.59	0.52	0.42	53.0	30.4	16.6
	Xinzo	Ah2	9.17	4.53	7.11	4.28	1.01	0.24	2.06	2.84	3.27	0.76	0.24	54.5	29.1	16.4
		A	6.64	3.29	4.30	1.32	0.79	0.50	2.33	2.98	0.53	0.29	0.50	46.9	34.5	18.6
	Monte Castro I	A	9.31	4.20	6.75	1.39	1.39	0.65	2.56	5.36	0.00	0.74	0.65	55.4	29.6	15.0
	Monte Castro II	A	8.95	4.10	5.63	1.62	1.09	0.47	3.33	4.01	0.53	0.61	0.47	60.2	27.0	12.8
	Goias I	Ah	8.60	3.66	6.08	1.16	1.16	0.44	2.52	4.92	0.00	0.72	0.44	54.4	29.9	15.7
	Goias II	A	8.96	3.51	6.23	1.11	1.11	0.52	2.73	5.12	0.00	0.58	0.52	51.7	26.9	21.4
	Coristanco	Ah1	7.12	3.36	5.03	1.30	1.30	0.39	2.09	3.73	0.00	0.91	0.39	62.5	22.4	15.1
	Breixa	Ah2	5.20	1.64	3.56	0.40	0.39	0.13	1.64	3.16	0.01	0.26	0.13	59.9	21.9	18.2
	A Golada	Ap1	2.48	1.04	2.43	2.34	0.29	0.09	0.05	0.09	2.05	0.20	0.09	45.1	37.6	17.3
		Ap2	2.49	1.22	2.46	1.71	0.29	0.10	0.03	0.75	1.42	0.19	0.10	40.4	39.3	20.3
SERPENTINA (n=9)	Melide	A	4.30	1.34	3.68	2.31	0.50	0.28	0.62	1.37	1.81	0.22	0.28	39.0	35.0	26.0
	Vilouriz	A	5.56	1.31	5.40	3.90	0.88	0.32	0.16	1.50	3.02	0.55	0.32	41.9	37.7	20.4
	Pena Armada	A	6.95	1.70	5.63	1.26	1.26	0.67	1.33	4.37	0.00	0.59	0.67	41.1	37.2	21.7
	Campo Marzo	A	2.32	0.91	2.16	1.65	0.40	0.08	0.16	0.51	1.25	0.32	0.08	46.2	30.9	22.9
	Morais I	Ap	0.63	0.18	0.63	0.30	0.09	0.04	0.00	0.33	0.21	0.05	0.04	60.8	22.4	16.8
	Morais II	A	0.38	0.30	0.38	0.24	0.24	0.08	0.00	0.14	0.00	0.16	0.08	49.4	28.8	21.8
	Limões	A	1.18	0.21	1.18	1.05	0.22	0.07	0.00	0.13	0.83	0.16	0.07	44.6	36.1	19.3
	Bragança	A	2.70	0.60	2.70	2.16	0.32	0.28	0.00	0.54	1.84	0.04	0.28	37.5	41.3	21.2
	A Soeira	A	1.28	0.34	1.28	1.11	0.22	0.09	0.00	0.17	0.89	0.13	0.09	50.1	33.2	16.7
GRANULITA (n=5)	Mirador Capelada	Ah1	9.65	5.19	5.14	2.48	1.00	0.55	4.51	2.66	1.48	0.45	0.55	75.2	14.7	10.1
		Ah2	5.59	3.60	4.98	1.36	0.38	0.20	0.61	3.62	0.98	0.18	0.20	71.0	16.0	13.0
	Forte Vello	Ap1	3.13	1.57	2.94	2.03	0.32	0.18	0.19	0.92	1.71	0.14	0.18	47.0	33.1	19.9
		Ap2	2.92	1.33	2.79	2.16	0.28	0.16	0.13	0.63	1.88	0.12	0.16	50.6	31.2	18.2
		Ap3	2.58	1.21	2.34	1.98	0.18	0.12	0.24	0.36	1.80	0.06	0.12	50.9	30.6	18.5
ESQUISTO (n=3)	Adegahna	A	1.35	0.43	1.35	1.02	0.26	0.10	0.00	0.33	0.76	0.16	0.10	41.0	49.6	9.4
	Gouveia	A	1.34	0.37	1.34	1.08	0.24	0.05	0.00	0.26	0.84	0.20	0.05	51.8	41.0	7.2
	Sendim da Serra	A	0.82	0.30	0.82	0.12	0.12	0.04	0.00	0.70	0.00	0.08	0.04	45.4	36.3	18.3
GNEIS (n=1)	P. Masanteo	Ah	8.47	3.18	5.33	2.22	0.88	0.63	3.14	3.11	1.34	0.25	0.63	65.9	18.5	15.6

C<sub>T</sub>: C total obtenido mediante combustión.

C<sub>p</sub>: C obtenido a partir de la extracción con pirofosfato sódico.

C<sub>DC</sub>: fracción de C obtenida mediante la oxidación de la muestra con dicromato potásico en caliente.

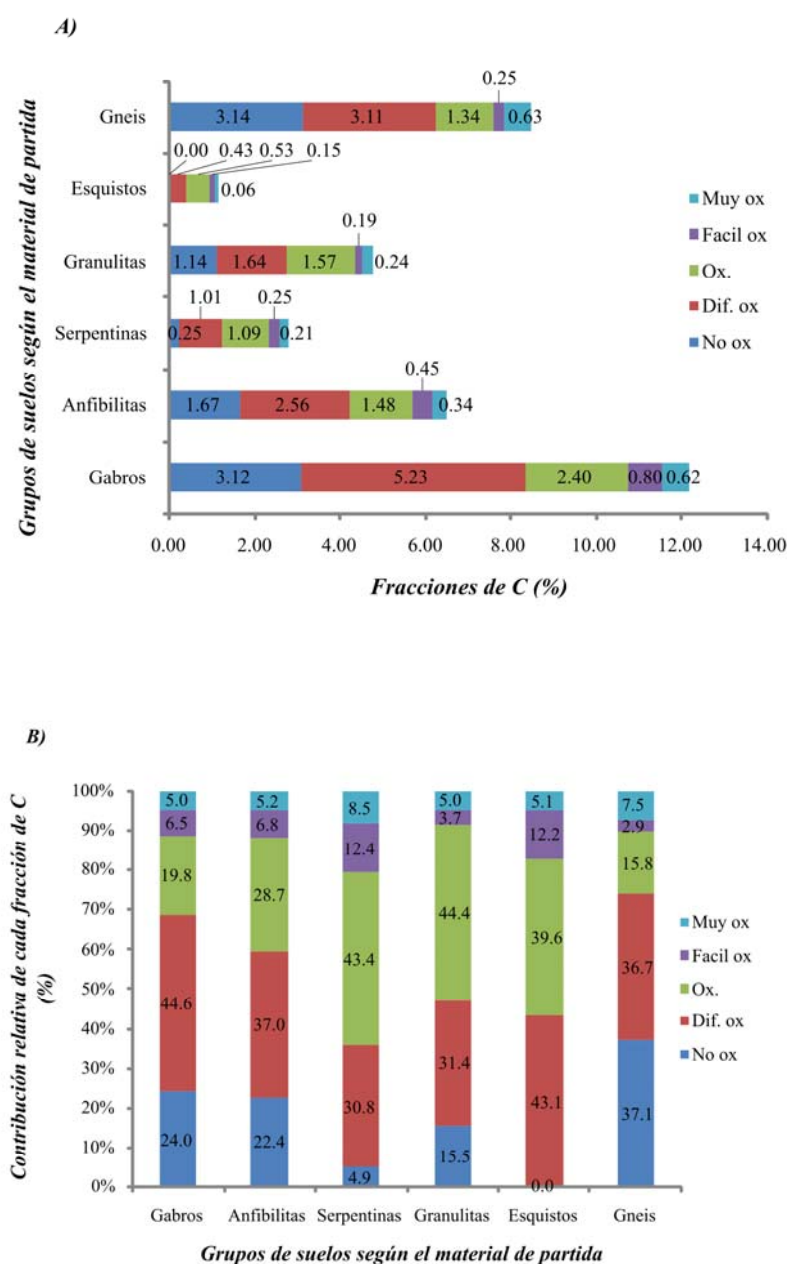
C<sub>DF</sub>: fracción de C obtenida mediante la oxidación de la muestra con dicromato potásico en frío.

C<sub>P200mM</sub>: fracción de C obtenida mediante la oxidación de la muestra con permanganato potásico 200mM.

CP33mM: fracción de C obtenida mediante la oxidación de la muestra con permanganato potásico 33mM.



El horizonte Ah del perfil de Península de Masanteo (gneis) presenta valores muy similares a los horizontes de suelos gabroicos y anfibolíticos (Tabla 2). Aunque el contenido en C total es menor (8,47 %) en comparación con los hallados en suelos gabroicos (entre 7,1-18,3 %, Tabla 1), las elevadas cantidades de todas las fracciones de C determinadas en el horizonte de Península de Masanteo se explicarían por la presencia de gran cantidad de formas de Al reactivo y en menor medida a la presencia de minerales de bajo grado de orden, tal y como lo sugiere el test de reactividad de  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  (10,6; Tabla 1) y los valores prácticamente iguales de  $\text{Al}_\text{p}$  y  $\text{Al}_\text{o}$  (10,4 y 10,5  $\text{g kg}^{-1}$ ; Tabla 1), que indican que la mayor parte del Al amorfo se encuentra en forma de complejos



**Figura 2.- A)** Contribución media de cada fracción de C (%) al porcentaje medio de C total en cada grupo de suelos; **B)** Contribución relativa media de cada fracción de C, al porcentaje total de C total en cada grupo de suelos. Los grupos de suelos se han establecido en función del material de partida del que proceden, y las fracciones de C en función de su grado de oxidabilidad.

Al-humus, lo que le proporciona a ésta un cierto grado de protección frente a la degradación (Higashi, 1983). Aunque presenta un valor de la relación molar  $(Al_o-Al_p)/Si_o$  muy inferior a 2 (0,67, Tabla 8, Anexo 2), a las condiciones de pH del suelo (4,4, Tabla 1), inferior a 4,9, pH a partir del cual se forma alofano e imogolita (Shoji y Fijiwara, 1984), si se determina su contenido en alofano, de acuerdo con el método propuesto por Parfitt y Henni (1982), podemos comprobar que éste (0,4 %) es superior al de algunos horizontes de los suelos sobre anfibolitas (entre 0,3 y 1,4 %, Tabla 1) y granulitas (0,3 %, Tabla 1). La formación de minerales de bajo grado de orden en estas condiciones, se ve favorecida por las condiciones climáticas y térmicas de la zona, que favorecen los procesos de meteorización y que contribuyen a la liberación de gran cantidad de Al reactivo. Los niveles tan elevados de formas de Al reactivo sobrepasa la capacidad de complejación de la materia orgánica y permite, de esta forma, la reacción entre éste y el Si para dar lugar a minerales amorfos, que contribuyen, junto con la formación de complejos Al-humus, a la estabilización del C orgánico en el suelo. La presencia de complejos Al-humus y minerales amorfos en el horizonte A de Península de Masanteo explica su alto contenido medio en formas de C estables (*C No ox.*: 3,14 % y *C dif. Ox.*: 3,11 %, Fig. 2 A) que pueden llegar a suponer el 73,4 % del total de C presente (Fig. 2 B).

El siguiente conjunto en importancia, por los altos valores de todas las fracciones de C determinadas, está constituido por los suelos derivados de anfibolitas y las granulitas (Fig. 2 A) que, aunque con valores significativamente inferiores ( $P < 0,01$ ) a los obtenidos para los horizontes superficiales de suelos gabroicos (Fig. 2 A), presentan diferencias significativas ( $P < 0,01$ ) con los restantes grupos de suelos (serpentinias y esquistos). Las fracciones de C más abundantes fueron, al igual que en gabros y gneis, las más estables, *C No ox.* y *C dif. ox.*, que llegan a representar entre el 22,4 y el 37,0 %, para el caso de las anfibolitas, y entre el 15,5 y el 31,4 %, para el caso de las granulitas, respectivamente. El test de reactividad de  $pH_{NaF}$  (anfibolitas: 9,4-11,9; granulitas: 9,7-12,0; Tabla 1) junto con valores de  $Al_p/Al_o$  relativamente próximos a 1 (anfibolitas: 0,7-0,9; granulitas: 0,2-0,6; Tabla 1) y los valores de  $pH_{H_2O}$  (anfibolitas: 4,3-5,4; granulitas: 4,5-5,5; Tabla 1) indican que las fracciones estables de estos suelos se encuentran estabilizadas principalmente por la formación de complejos Al-humus y por la existencia de minerales de bajo grado de orden como el alofano (anfibolitas: 0,3-1,4 %; granulitas: 0,3 %; Tabla 1). Este hecho se confirma con la alta correlación ( $R^2 = 0,938$  y  $R^2 = 0,835$ ;  $P < 0,01$ ) hallada entre el  $C_p$  y las fracciones de *C No ox.* y *C dif. ox.* (Fig. 3). Si tenemos en cuenta el hecho de que el pirofosfato desplaza específica y efectivamente los ligandos orgánicos unidos a la fracción mineral del suelo, incluyendo dentro de éstas las especies de Al amorfas (Kaiser y Zech, 1996) se puede llegar a la conclusión de que la mayor parte del C estable se encuentra protegida bien por la unión a superficies minerales, alofano o imogolita, o bien complejoado con especies hidroximetálicas, o por ambas.

En el extremo opuesto, con bajas cantidades tanto en el C total como en las otras formas (Tabla 2), se encuentran los suelos desarrollados sobre serpentinias y esquistos. Esta escasez de formas orgánicas viene determinada por las condiciones climáticas (esquistos) y la litología (serpentinias) fundamentalmente. En el caso de los suelos de esquistos las condiciones de aridez, como consecuencia de las escasas precipitaciones (Adeganha y Gouveia: 600 mm año<sup>-1</sup>; Sendim da Serra: 800-1000 mm año<sup>-1</sup>) y las elevadas temperaturas anuales medias, generalmente superiores a 10 °C (Sendim da Serra) e incluso superiores a 14 °C (Adeganha y Gouveia) que se dan en área de localización (Noreste de Portugal), imposibilitan la acumulación de materia orgánica en

estos suelos dado que la producción primaria neta es escasa, como consecuencia del déficit hídrico (Post y col., 1982), y la tasa de mineralización muy elevada (Ladd y col., 1985; Parton y col., 1987; Sala y col., 1988; Burke y col., 1989; USDA-SCS, 1994; Bird y col., 1996). Por otra parte, los suelos desarrollados sobre materiales serpentínicos, los valores bajos en el test de reactividad de  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  (media de 9,2) y de concentración de  $\text{Al}_\text{p}$  ( $0,2\text{--}6,1 \text{ g kg}^{-1}$ ),  $\text{Al}_\text{o}$  ( $1,0\text{--}6,7 \text{ g kg}^{-1}$ ) y  $\text{Si}_\text{o}$  ( $0,4\text{--}1,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) sugieren que la presencia de formas de Al reactivas y de minerales de bajo grado de orden, capaces de estabilizar C, son relativamente escasas, lo que explicaría el bajo contenido en materia orgánica de estos suelos. Además, existen limitaciones características de este tipo de materiales, como la presencia de cantidades elevadas de metales pesados y/o grandes concentraciones de  $\text{Mg}^{+2}$  como principal constituyente del complejo de cambio ( $1,21\text{--}4,84 \text{ cmol}_{\text{c}(+)} \text{ kg}^{-1}$ ; Tabla 9, Anexo 3) (suelos hipermagnésicos), que imposibilitan una buena producción primaria.

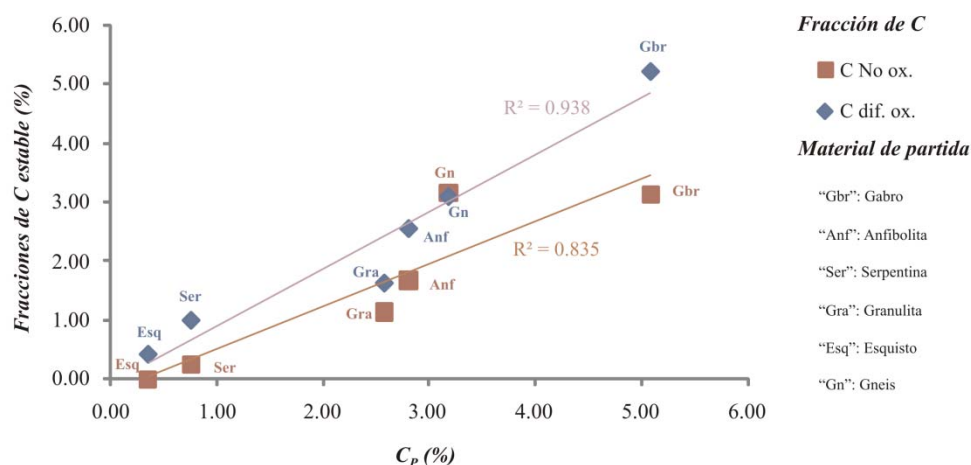
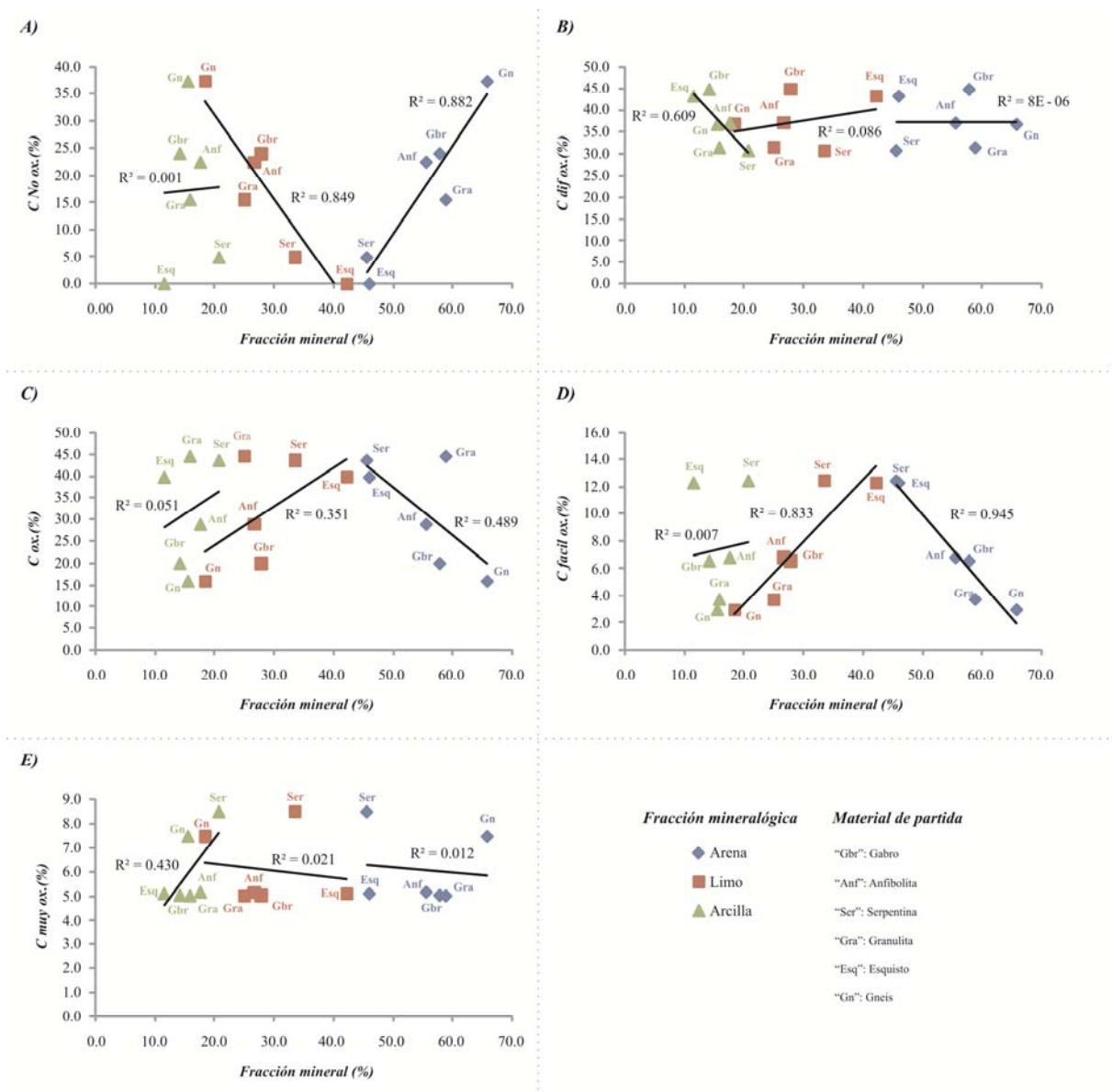


Figura 3.- Relación porcentual entre el C extraído en pirofosfato sódico y las fracciones orgánicas más estables (C No ox. y C dif. ox.).

Diversas investigaciones (Parton y col., 1987; Jenkinson, 1990; Smith y col., 1997) han puesto de manifiesto que las diferentes fracciones que constituyen el total del C presente en un suelo presentan una correlación negativa entre el tamaño y la tasa de descomposición, de forma que ésta es mayor cuanto menor es el tamaño de la fracción. En concordancia con estos estudios, se han encontrado correlaciones muy buenas entre las diferentes fracciones granulométricas y los porcentajes relativos de las formas de C oxidable presentes en los suelos estudiados (Fig. 4). Así, el porcentaje relativo de C no oxidable presenta una correlación positiva ( $R^2 = 0,882$ ;  $P < 0,01$ ) con la fracción arena, mientras que con las demás fracciones, limo y arcilla, dicha correlación es significativamente negativa ( $R^2 = 0,849$ ;  $P < 0,01$ ) y nula, respectivamente (Fig. 4 A). No se ha encontrado ningún tipo de correlación entre la fracción de C dif. ox. y las fracciones arena y limo (Fig. 4 B), aunque existe una cierta relación negativa ( $R^2 = 0,609$ ;  $P < 0,05$ ) con la fracción arcilla (Fig. 4 B). Por otra parte, el C ox. y el C fácil. ox. presentan una correlación negativa (Fig. 4 C y D) con el contenido en arena ( $R^2 = 0,489$ ;  $P < 0,05$  y



**Figura 4.-** Relaciones porcentuales entre las distintas fracciones mineralógicas (%) y las diferentes fracciones de C oxidable. **A)** Fracciones mineralógicas vs.  $C_{No\ ox.}$ ; **B)** Fracciones mineralógicas vs.  $C_{dif.\ ox.}$ ; **C)** Fracciones mineralógicas vs.  $C_{ox.}$ ; **D)** Fracciones mineralógicas vs.  $C_{fácil.\ ox.}$ ; **E)** Fracciones mineralógicas vs.  $C_{muy\ ox.}$ .

$R^2 = 0,945$ ;  $P < 0,01$ , respectivamente), mientras que ésta es positiva con las fracciones granulométricas más finas (Fig. 4 C y D) y mayor en el caso del  $C_{fácil.\ ox.}$  y la fracción limo ( $R^2 = 0,833$ ;  $P < 0,01$ ) (Fig. 4 D). Por último, se ha encontrado una cierta correlación positiva entre la fracción orgánica más lábil ( $C_{muy\ ox.}$ ) y la fracción granulométrica más fina (arcilla) ( $R^2 = 0,430$ ;  $P < 0,05$ ) (Fig. 4 E), mientras que con las restantes fracciones (limo y arena) no presenta ningún tipo de correlación (Fig. 4 E).

Aunque son muchos los estudios que han mostrado correlaciones positivas entre el C orgánico del suelo y el contenido en arcilla de los mismos (Schimel y col., 1985a,b; Oades, 1989; Spain, 1990; Feller y col., 1991; Amato y Ladd, 1992), lo que sugiere que es la fracción arcilla la que proporciona un mayor grado de protección

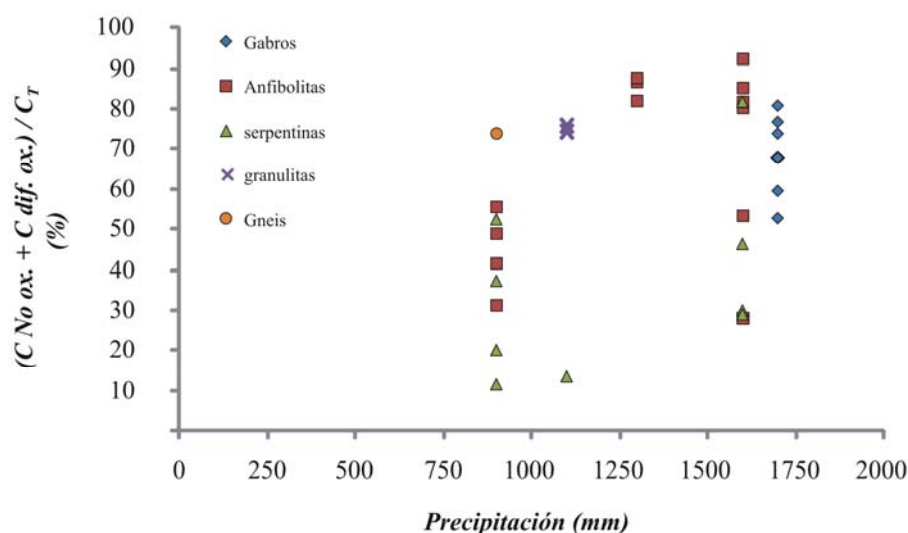
de la fracción orgánica del suelo frente a la degradación microbiana (mediante procesos de adsorción), los resultados del presente estudio, con una buena correlación entre el *C No ox.* y la fracción arena (Fig. 4 A), y una escasa relación entre el *C dif. ox.* y las fracciones arena y limo junto con la relación negativa entre esta última fracción orgánica y la fracción arcilla (Fig. 4 B), indican que son los minerales de bajo grado de orden junto con las formas de Al más reactivas (amorfas) las que confieren un mayor grado de estabilidad a la fracción orgánica presente en este tipo de suelos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Lilienfein y col. (2004), quienes mostraron que la adsorción del carbono orgánico disuelto aumentaba de forma proporcional al incremento en el contenido en minerales de bajo grado de orden y que pueden actuar como estabilizadores de biomasa microbiana y metabolitos (Zunino y col., 1982; Saggar y col., 1996), y con los de diversos investigadores (Veldkamp, 1994; Shang y Tiessen, 1998; Percival y col., 2000; Masiello y col., 2004) que mostraron la existencia de una buena correlación entre la presencia de complejos Al-humus y la estabilización de las formas de C. Ambas fracciones, minerales de bajo grado de orden y complejos Al-humus, contribuyen a incrementar el tiempo de residencia de la fracción orgánica en el suelo (Torn y col., 1997; Parfitt y col., 2002).

Las correlaciones relativamente buenas entre las fracciones de *C ox.* y *C fácil. ox.* las fracciones minerales más ligeras (Fig. 4 C y D) es indicativo de existe algún tipo de relación especial entre ellas y que le proporciona un cierto grado de estabilidad. La condición estructural de los suelos, determinada por la textura, ejerce un control significativo sobre los procesos de degradación de descomposición biológica, dado que limita en muchas ocasiones la accesibilidad a la materia orgánica del suelo de los microorganismos descomponedores (Krull y col., 2003). Esta limitación viene dada por la capacidad que presentan las fracciones minerales más ligeras de formar agregados incluyendo dentro de ellos una parte de la fracción orgánica del suelos, no tan recalcitrante como la estabilizada mediante la formación de complejos Al-humus o por la adsorción a minerales de bajo grado de orden, y protegerla así frente a la degradación microbiana (Golchin y col., 1994, 1997; Buurman y col., 2007). Otro factor que contribuye a estabilizar estas fracciones de C orgánico es la capacidad de la fracción arcilla de encapsular materiales orgánicos (Tisdall y Oades, 1982). Ambos factores explicarían el alto porcentaje relativo de ambas fracciones en suelos desarrollados sobre serpentinas (*C ox.*: 43,4 %; *C fácil. ox.*: 12,4 %; Fig. 2 B), esquistos (*C ox.*: 39,6 %; *C fácil. ox.*: 12,2 %; Fig. 2 B), suelos en los que, con textura entre franco a franco arcillosa, además, las arcillas 2:1 del tipo cloritas (ver epígrafe de mineralogía) presentan una abundancia mayor en comparación con los restantes grupos e suelos. En suelos sobre granulitas la presencia de agregados junto con la existencia de arcillas 2:1 (cloritas) explicaría que en ellos se den altas concentraciones relativas de *C ox.* (44,4 %; Fig. 2 B). Sin embargo, son suelos con textura franco arenosa que, aunque permite la formación de agregados, no imposibilita demasiado el acceso de los microorganismos, lo que explicaría los bajos niveles relativos del *C fácil. ox.* (3,7 %; Fig. 2 B), lo cual se ve favorecido por unas condiciones de temperatura y humedad idóneas que contribuyen de forma sustancial a un aumento de la tasa de mineralización.

Por último, la fracción orgánica correspondiente al *C muy ox.* presenta una correlación relativamente positiva con la fracción arcilla (Fig. 4 E), lo que se debe, fundamentalmente a que se corresponde con materia orgánica vegetal y animal muy particulada y que todavía se encuentra en proceso de humificación. Los altos valores relativos de esta fracción orgánica hallados en suelos sobre serpentinas (8,5 %, Fig. 2 B) y gneis (7,5 %, Fig. 2 B) se deben principalmente a las condiciones de temperatura, humedad y litología que se dan en las áreas



de localización. De esta forma, en suelos sobre serpentinas, en los que la producción primaria se ve dificultada por la existencia de metales pesados (ver epígrafe de geología), altos contenidos en  $Mg^{+2}$  en el complejo de cambio (Tabla 9, Anexo 3), etc., las tasas de mineralización se ven ralentizadas por: i) la presencia de material orgánico difícilmente degradable por los microorganismos; y ii) por las condiciones litológicas que no favorecen la actividad microbiana. Ambos factores provocan, en conjunto, una acumulación de material orgánico en superficie puesto que los microorganismos aquí establecidos necesitan un tiempo mayor de actividad para degradar una misma cantidad de material orgánico. En contraposición, los suelos desarrollados sobre este tipo de gneises, entre los que aparecen, generalmente, otras rocas básicas, como anfibolitas con granate o cuarzo anfibolitas, hay una gran producción primaria y fácilmente degradable. Esto hace que en muchas ocasiones los microorganismos no sean capaces de degradar la materia orgánica al mismo tiempo que se genera, permitiendo de esta forma su acumulación.



aumentar el porcentaje cuando se incrementa la pluviometría (Fig. 5). Sin embargo, las diferencias en ambos criterios son muy elevadas de unos suelos a otros, por lo que a pesar de su valor indicativo de acumulación en los suelos ándicos de un mayor porcentaje de formas resistentes no parece que pueda utilizarse con fines de discriminación del grado o importancia del carácter ándico.

### **3.4. Mineralogía de Suelos**

Los resultados obtenidos en el análisis de difracción de RX muestra diferencias significativas en cuanto a la composición mineralógica de los perfiles estudiados. Aunque la composición mineralógica es muy similar, dado que en la práctica totalidad de los perfiles se observa la presencia de caolinita, clorita, vermiculita, gibbsita y cuarzo, existen claras diferencias en cuanto a la contribución de cada una de las formas mineralógicas, suscitadas principalmente por la diferenciación litológica y climática.

#### **3.4.1. Mineralogía de Suelos Anfibolíticos**

Los patrones de difracción de RX correspondientes a la fracción arcilla de los perfiles de suelos desarrollados a partir de materiales anfibolíticos, permiten la identificación de filosilicatos 2:1 (clorita y vermiculita), 1:1 (caolinita), hidróxidos de Al (gibbsita), hidróxidos de Fe (goethita) y cuarzo.

Los efectos a 14 Å, junto con los efectos a 7 y 4,72 Å, incluso en el agregado orientado calcinado a 550 °C, pone de manifiesto la presencia de cloritas predominantemente en los horizontes subsuperficiales de los perfiles de Estación de Mera II, Xinzo y Monte Castro II (Fig. 16 A, 17 A y 18 A; Anexo 4) y en el horizonte Ah<sub>1</sub> del perfil de Monte Castro I (Fig. 6 A). El hecho de que la clorita se presente como un mineral heredado, después de los procesos de meteorización de rocas metamórficas, donde se presenta como mineral accesorio (Bailey, 1988), explicaría la presencia de este mineral en los horizontes más profundos de los suelos anfibolíticos. Sin embargo, en el perfil de Monte Castro I (Fig. 6 A y B) observamos que la clorita es uno de los minerales más abundantes en el horizonte superficial (Fig. 6 A), lo que sugiere, dada la naturaleza policíclica del perfil, que se ha originado como consecuencia de la deposición de materiales más jóvenes procedentes de áreas colindantes.

Sin embargo, lo más frecuente en suelos anfibolíticos, es la presencia de un efecto a 14 Å en todos los agregados que colapsa hacia una banda más o menos amplia en la región de 10 Å en el agregado orientado saturado en K<sup>+</sup> y calcinado a 550 °C, lo que indica la presencia de vermiculita, fundamentalmente trioctaédrica, que será más o menos abundante en función de la mayor o menor presencia de minerales como clorita y sobre todo de illita, principalmente biotita (De la Calle y Suquet, 1988) y del grado de meteorización, mayor cuanto más intensa (Douglas, 1989). De acuerdo con esto, los mayores niveles de vermiculita se observan en los horizontes Ah<sub>1</sub> de Estación de Mera I (Fig. 6 E) y Ah y B<sub>3</sub> del perfil de Estación de Mera II (Fig. 16 A y B, Anexo 4), en los que tanto la clorita como la illita, con efectos a 10 y 5 Å, están presentes.

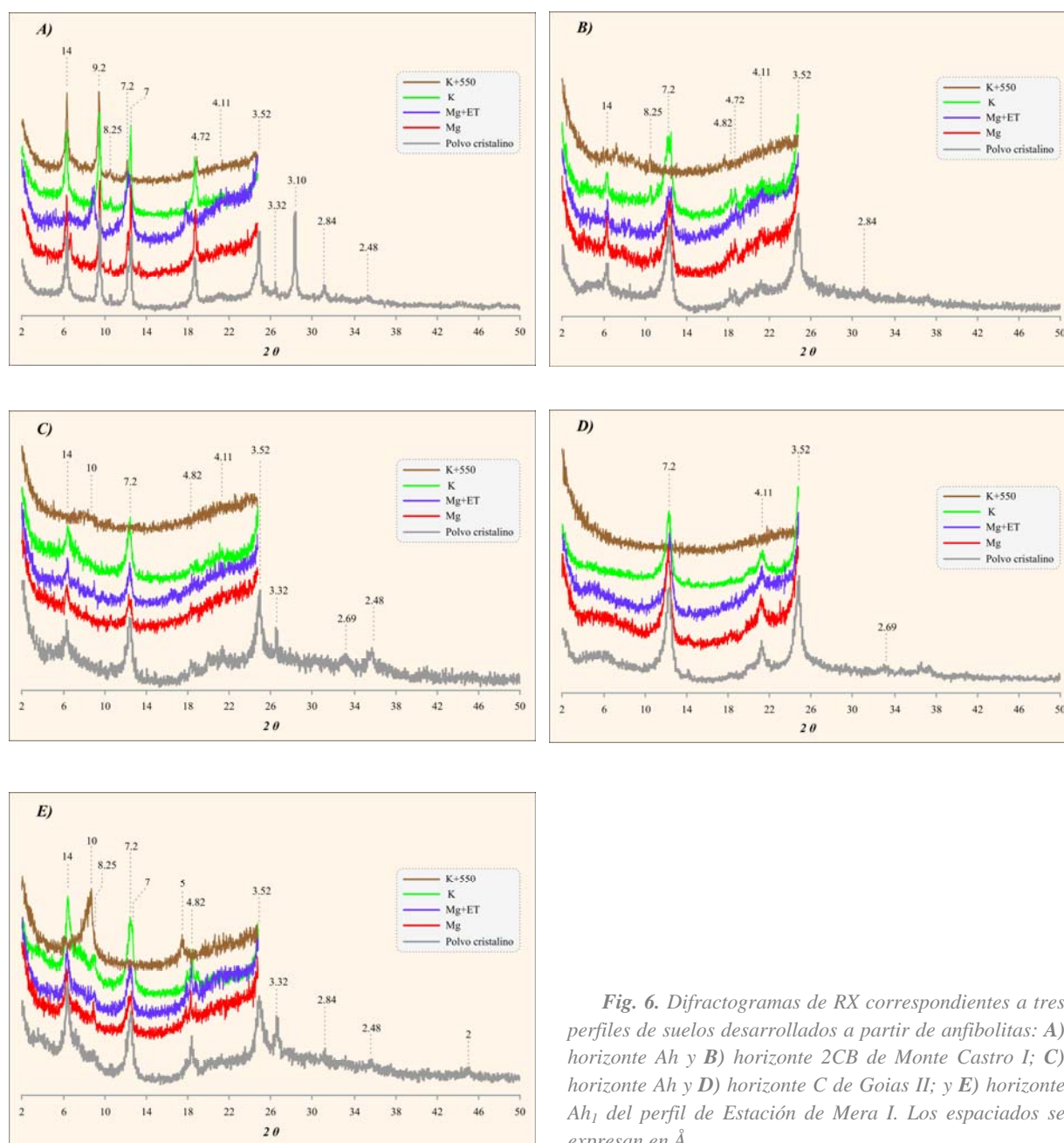


Fig. 6. Difractogramas de RX correspondientes a tres perfiles de suelos desarrollados a partir de anfíbolitas: A) horizonte Ah y B) horizonte 2CB de Monte Castro I; C) horizonte Ah y D) horizonte C de Goias II; y E) horizonte Ah<sub>1</sub> del perfil de Estación de Mera I. Los espaciados se expresan en Å.

El efecto a 7,2 Å, que desaparece con el incremento de temperatura (550 °C), junto con un efecto a 3,32 Å indica la presencia de caolinita. Por último, los escasos efectos a 4,82 y 4,32 Å y a 3,32 y 2,48 Å indican trazas de gibbsita y cuarzo respectivamente, salvo para el horizonte BC del perfil de Xinzo (Fig. 17 B, Anexo 4) en que la gibbsita es especialmente abundante. La acumulación de gibbsita de varios grados de cristalinidad en los horizontes subsuperficiales de los suelos de Galicia, derivados de rocas tanto ígneas como metamórficas que

desarrollan grados de meteorización incipiente, se atribuye a procesos de neoformación los cuales están inhibidos en horizontes en los que existe una mayor cantidad de materia orgánica (Macías, 1981).

Se observan efectos significativamente elevados a 9,2 Å (en todos los agregados) y 3,10 Å, tanto en el horizonte superficial del perfil de Monte Castro I (Fig. 6 A) como el horizonte A y C del perfil de Monte Castro II (Fig. 18 A y B, Anexo 4), lo que indica la existencia de talco, mineral característico de rocas metamórficas ultrabásicas ricas en Mg y Fe y pobres en Si (Justo y col., 1987; Singer y Stoffers, 1987; Bulmer y col., 1992; Buhmann y Shoeman, 1995). Esto se debe a la ubicación de los perfiles dentro del Complejo de Rocas de Melide, caracterizado por la presencia de rocas serpentinizadas entre las que se encuentran las anfíbolitas de Monte Castro I y II. La presencia de este mineral en el horizonte Ah del perfil de Monte Castro I, y dada su naturaleza policíclica, sugiere que procede de la deposición de material procedente de áreas colindantes, mientras que su ubicación en el horizonte C del perfil de Monte Castro II es un indicador de la inclusión de material serpentínico entre la roca anfíbolítica.

Por último, el escaso efecto a 8,25 Å pone de manifiesto la existencia de trazas de anfíbol en todos los horizontes del perfil de Monte Castro I (Fig. 6 A y B) y en Ah<sub>1</sub> del perfil de Estación de Mera I (Fig. 6 E), mineral primario que todavía se encuentra en proceso de meteorización (ver también Anexo 4). Además, el elevado ruido observado en todos los difractogramas junto con las ondulaciones en la línea base indican de la presencia de grandes cantidades de material amorfo, complejos organoaluminicos y minerales de bajo grado de orden como el alofano, lo que concuerda con los resultados obtenidos en el análisis de las fracciones aluminicas (ver epígrafe caracterización e suelos).

### 3.4.2. Mineralogía de Suelos sobre rocas serpentinizadas

Los suelos serpentínicos presentan, entre ellos, una composición mineralógica muy similar, aunque con ligeros matices dependiendo de la ubicación de los suelos que, tal y como se ha visto al principio del presente capítulo, se encuentran distribuidos en tres zonas: i) complejo de Rocas de Melide, perfiles de Melide, Vilouriz y Pena Armada; ii) Unidad de Metatexitas y Diatexitas del Dominio Externo, perfil de Campo Marzo; y iii) los ubicados en las distintas formaciones geológicas del noreste de Portugal, perfiles de Morais I y II (Complejo Alóctono Superior), Limãos (Unidad de Morais-Talhinhas), Bragança y A Soeira (Macizo de Bragança). Aunque los distintos materiales de partida presentan ligeras diferencias de composición, el principal factor de diferenciación se encuentra en la variación de las condiciones climáticas (temperatura y precipitación, ver epígrafe 2.1.2) que condicionan los procesos de meteorización y por ende la composición mineralógica de la fracción arcilla.

En la Fig. 7 se muestran algunos de los difractogramas de RX pertenecientes la fracción arcilla de suelos serpentínicos. Los patrones de difracción de RX muestran picos muy bien definidos y con un escaso ruido de fondo, lo que puede indicar que gran parte de la difracción observada se deba a la composición mineralógica de la fracción limo en lugar de a la fracción arcillosa, sobre todo en aquellos suelos ubicados en zonas bajo regímenes ombrotérmicos más secos, como es el caso de los perfiles de Morais II (Fig. 7 E y F) y Bragança (Fig.

27, Anexo 4), principalmente, y en suelos con un grado de desarrollo incipiente, como es el caso del perfil de Pena Armada (Fig. 24 A y B, Anexo 4). Teniendo esto en cuenta, se observa la presencia de grandes cantidades de clorita, tal y como lo indican los efectos a 14 y 7 Å (que se mantienen incluso en agregado orientado calcinado a 550 °C) y a 4,72 y 2,84 Å. Si atendemos a la intensidad de los picos de difracción correspondientes a la clorita, podemos observar que su intensidad se incrementa a medida que las condiciones climáticas se vuelven más extremas. De esta forma, a medida que disminuye la precipitación y la temperatura aumenta, caso de los suelos de Morais I (Fig. 25, Anexo 4) y II (Fig. 7 E y F), Limãos, Bragança y A Soeira (Fig. 26, 27 y 28, Anexo 4), las cantidades de clorita son más elevadas, dado que los procesos de meteorización que darían lugar a vermiculitas (Ross y Kodama, 1974; Coffman y Fanning, 1975; Churchman, 1980; Bain y Duthie, 1984; Righi y col., 1993) o esmectitas (Senkayi y col., 1981; Carnicelli y col., 1997) son menos eficaces en estas condiciones. Esto se pone de manifiesto por la ausencia del efecto a 10 Å en el agregado orientado calcinado a 550 °C en la práctica totalidad de los suelos serpentínicos, salvo en el caso del perfil de Limãos (Fig. 26, Anexo 4) en el que se observan trazas de vermiculita, bien como consecuencia de la degradación de la clorita o bien como consecuencia de la degradación de illita, también presente en este perfil tal y como lo indican los efectos de difracción a 10 y 5 Å, ambos presentes en todos los agregados, y 2 Å, en el polvo cristalino. La presencia de intergrados clorita-vermiculita sólo se observan en el perfil de Pena Armada (Fig. 24 A y B, Anexo 4) en el que el efecto a 14 Å colapsa a 12 Å en el agregado orientado saturado en K<sup>+</sup> y calcinado a 550 °C.

Al igual que en el caso del perfil anfibolítico de Monte Castro I (Fig. 6 A), la mayor parte de los perfiles serpentínicos presentan un efecto especialmente alto a 9,2 Å, lo que indica de la presencia de talco, sobre todo en aquellos perfiles con un menor grado de desarrollo en los que este mineral primario se encuentra sus primeras fases de degradación, como es el caso del perfil de Pena Armada (Fig. 24 A y B, Anexo 4) en el que también se han detectado cantidades apreciables de minerales ferromagnesianos sin degradar, tal y como lo indica el efecto a 6,14 Å dentro del horizonte Cg de este perfil (Fig. 24 B, Anexo 4).

En todos los perfiles de suelos serpentínicos se ha observado la presencia de caolinita, efectos a 7,2 Å, que desaparece en el agregado calcinado a 550 °C, y 3,52 Å, aunque cantidades muy variables (Fig. 7 y Anexo 4). La presencia de caolinita en este tipo de suelos puede ser debida a procesos de alteración hidrotermal, comunes en este tipo de formaciones geológicas y que llevan asociados la formación de caolinita como producto residual de meteorización (Murray y Keller, 1993), o a procesos de caolinitización de minerales ferromagnesianos, principalmente biotita (Harris y col., 1985a y b).

Por último se han detectado trazas de cuarzo, en la mayor parte de los perfiles (efectos a 3,32 y 2,48 Å) (Fig. 7 y Anexo 4), posiblemente de carácter alóctono, y de goethita (efectos a 4,11 Å, que desaparece al calcinar a 550 °C, y a 2,69 Å), formada a partir de hidrólisis del Fe (III) liberado durante los procesos de meteorización de los minerales ferromagnesianos (Bigham y col., 2002). Dada la necesidad de agua para la formación de goethita, ésta se detecta en cantidades relativamente altas en aquellas zonas sujetas a regímenes ombrotérmicos más húmedos, como es el caso de los perfiles de Campo Marzo (Fig. 7 C y D) y Melide (Fig. 23, Anexo 4), mientras que solamente se observan trazas en zonas mucho más secas, como las correspondientes a los perfiles de Morais I (Fig. 25, Anexo 4) y Limãos (Fig. 26, Anexo 4).



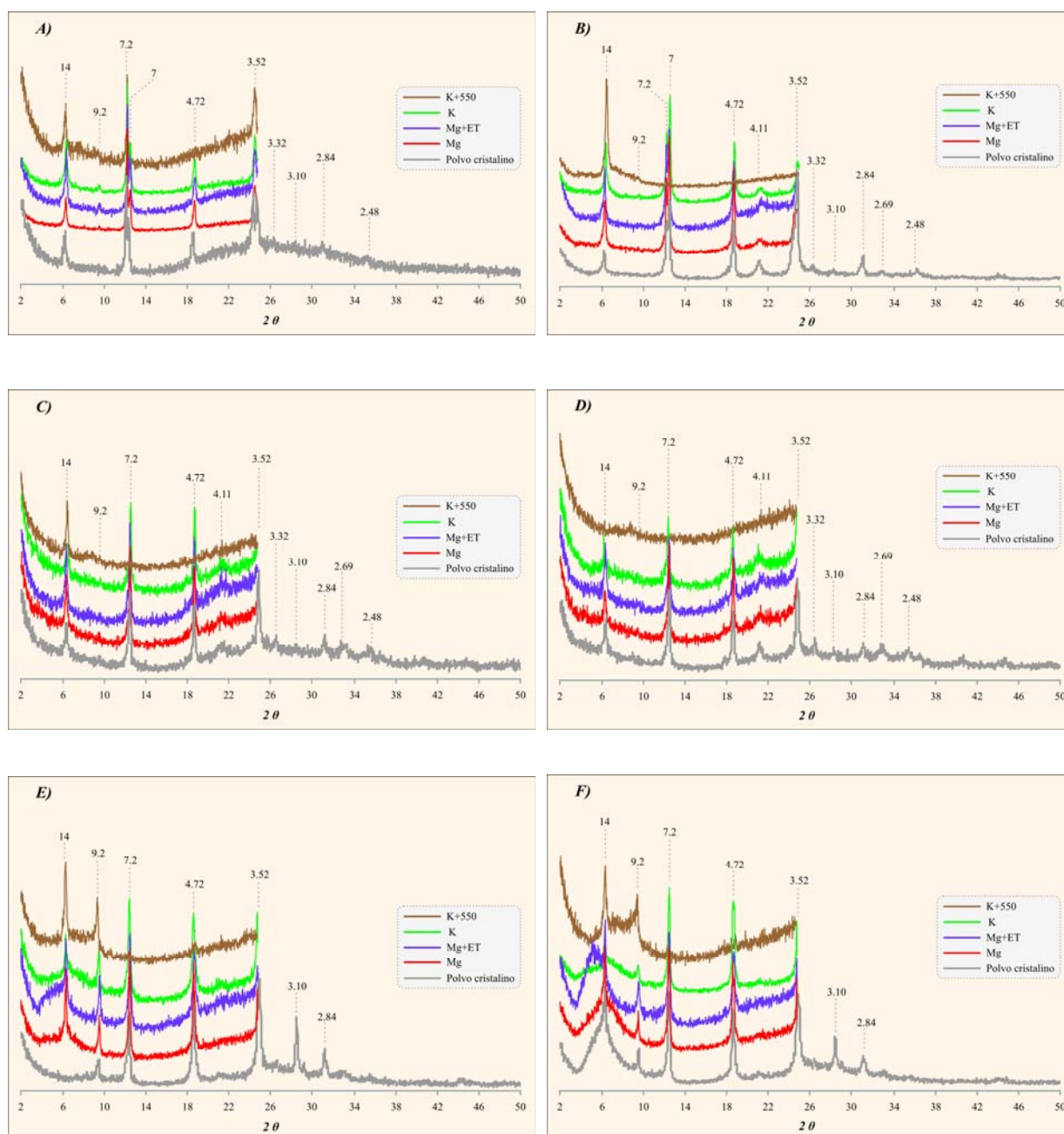


Fig. 7. Difractogramas de RX correspondientes a tres perfiles de suelos desarrollados a partir de serpentinas: A) horizonte Ah y B) horizonte BC de Vilouriz; C) horizonte Ah y D) horizonte B de Campo Marzo; y E) horizonte A y F) horizonte B del perfil de Morais II. Los espaciados se expresan en Å.

### 3.4.3. Mineralogía de Suelos sobre granulitas

Dentro de este grupo se incluyen los perfiles de Mirador de la Capelada (Fig. 8 A y B) y Forte Vello (Fig. 8 C y D). Ambos perfiles presentan diferencias significativas en cuanto a su composición mineralógica y grado de cristalinidad. En el primer caso, el horizonte superficial (Fig. 8 A) presenta un grado de cristalinidad mayor que el subyacente, tal y como puede apreciarse por el descenso de la intensidad de los picos de difracción (Fig. 8

B), aunque la composición es básicamente la misma. El efecto a 14 Å en toda la secuencia de difractogramas indica la presencia de trazas de clorita, aunque son prácticamente inapreciables los efectos a 7 Å, en el agregado orientado calcinado a 550 °C, y a 4,72 Å. El efecto a 7,2 Å, que desaparece con el incremento de temperatura (550 °C), junto con un efecto a 3,32 Å indica la presencia de caolinita. La baja intensidad de este último efecto, común para caolinita y clorita, sugiere que prácticamente se debe a la presencia de caolinita. La mayor parte del efecto a 14 Å con el incremento de temperatura, a 550 °C, colapsa a una banda más o menos extensa en tono a 10 Å, fenómeno que indica la presencia de vermiculita hidroxialumínica. Por último, los escasos efectos a 4.82 y 4,32 Å y a 3,32 y 2,48 Å indican trazas de gibbsita y cuarzo respectivamente. En el horizonte Ah<sub>2</sub> (Fig. 8 B) la composición mineralógica es prácticamente la misma, con la salvedad de que no hay efectos que muestren la presencia de clorita, siendo el grado de cristalinidad inferior al horizonte superficial.

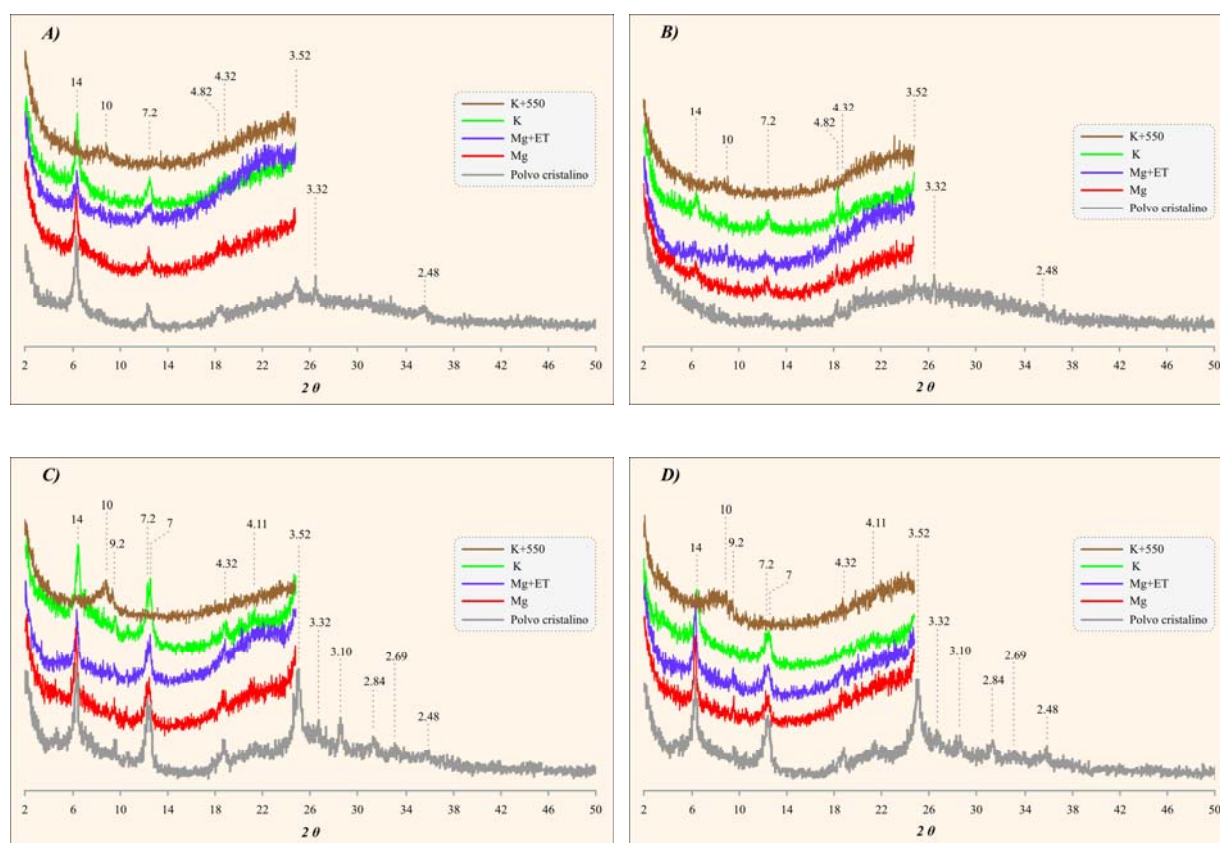


Fig. 8. Difractogramas de RX correspondientes a dos perfiles de suelos desarrollados a partir de granulitas: A) horizonte Ah<sub>1</sub>; B) horizonte Ah<sub>2</sub> de Mirador da Capelada; y C) horizonte Ap<sub>1</sub> y D) horizonte Ap<sub>3</sub> de Forte Vello. Los espaciados se expresan en Å.

En el perfil de Forte Vello (Fig. 8 C y D), tanto la composición como el grado de cristalinidad, mayor en este caso, varían significativamente en relación con el caso anterior. La vermiculita se encuentra presente en ambos horizontes, tal y como indica el efecto a 14 Å que colapsa 10 Å cuando se aumenta la temperatura a 550 °C, aunque en menor cantidad en el horizonte Ap<sub>3</sub> (Fig. 8 D). En segundo lugar, se observa la existencia de

caolinita, efectos a 7,2 y 3,52 Å, aunque en mayor cantidad en el caso del horizonte superficial (Fig. 8 C), lo que puede ser consecuencia del efecto del laboreo ya que los continuos cambios de temperatura, humedad y la ruptura de los agregados del suelo pueden favorecer los fenómenos de cristalización (Verde y col., 2005). Se observa también la presencia de cuarzo (efectos a 3,32 y 2,48 Å), goethita (efectos a 4,11 y 2,69 Å) y talco (efectos a 9,2 y 3,10 Å).

A pesar de proceder de materiales de partida similares, ambos perfiles muestran una composición mineralógica bastante distinta, lo que puede ser debido a diferencias estratigráficas. En el caso del perfil de Mirador da Capelada, el material de partida es la denominada *Granulita de Vacariza*, entre la que se intercalan gneises de plagioclasa y granate, mientras que en el de Forte Vello el material original es una anfibolita en facies granulítica, pirigarnitas, siempre en relación con ricas ultrabásicas serpentinizadas, lo que explica la presencia del talco en éste último.

#### 3.4.4. Mineralogía de Suelos sobre Gabros

Prácticamente la totalidad de los perfiles desarrollados a partir de los gabros de Monte Castelo (Ladeira de Pena Cabaleira y Fonte de Pena Cabaleira) presentan carácter amorfo, dada la escasa importancia de los picos de difracción observados (Fig. 9 y Anexo 4), salvo en el horizonte más profundo del perfil de Val do Dubra (Fig. 9 B) donde se aprecia una mayor cristalinidad. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Mizota y van Reeuwijk (1989), en el estudio de suelos ándicos desarrollados sobre cenizas volcánicas, y por Buytaert y col. (2005), igualmente en suelos ándicos pero pertenecientes a la región del páramo ecuatoriano. El Horizonte Ah<sub>1</sub> (Fig. 9 A) es prácticamente amorfo y solamente se pueden diferenciar trazas de tres minerales: i) vermiculita, por la presencia del efecto a 14 Å que colapsa a 10 Å (aunque el pico de difracción es inapreciable) en el agregado orientado calcinado a 550 °C; ii) caolinita, al presentarse un efecto a 7,2 Å en todos los difractogramas salvo en el agregado orientado calcinado a 550 °C y otro a 3,52 Å visible en el polvo cristalino; iii) cuarzo, por la presencia del pico principal de difracción a 3,32 Å. Sin embargo, al horizonte más profundo (Fig 9 B) el grado de cristalinidad aumenta considerablemente al presentar mayores cantidades de los minerales anteriormente descritos, salvo en el caso de la vermiculita, ausente en este horizonte, junto con cantidades importantes de gibbsita, tal y como indican los efectos a 4,82 y 4,32 Å, y goethita, efectos a 4,11 y 2,29 Å.

La presencia de cuarzo en los materiales gabroicos se ve justificada bien por la existencia de filones de este mineral que se atraviesan la roca o bien por la acción de soluciones hidrotermales que, durante el proceso de epidioritización, favorecieron la cristalización del mismo (Warnaars, 1967). La proximidad del accidente tectónico más importante de la zona, la falla meridiana sugiere que los procesos de hidrotermalismo son importantes en la evolución mineralógica de estos materiales.

Por otra parte, estudios sobre gibbsita (Eswaran y col., 1977; Nahon, 1991; Zeese y col., 1994) han puesto de manifiesto que la presencia de este mineral puede ser debida bien a sustituciones de la caolinita o bien, proceso que es muy común en horizontes C, o bien a su precipitación en horizontes superficiales muy meteorizados (Merino y col., 1993). La ausencia de gibbsita en horizonte superficial (Fig. 9 A) sugiere que uno

de sus orígenes principales puede ser el primero de los mencionados, aunque la proximidad a la falla meridiana hace pensar que también puede ser originada a partir de procesos de hidrotermalismo. De todas formas, tal y como se comentó en el caso de los suelos sobre anfibolitas, concretamente para el horizonte BC del perfil de Xinzo (Fig. 17 B, Anexo 4), con un comportamiento muy similar al del horizonte C de Val do Dubra (Fig. 9 B), la presencia de gibbsita en los horizontes subsuperficiales, sobre todo en suelos en los que el horizonte superficial es rico en materia orgánica, como es el caso de suelos gabroicos ( $C_T$  entre 7,1 % y 18,3 %; Tabla 1), se debe a procesos de neoformación (Macías, 1981).

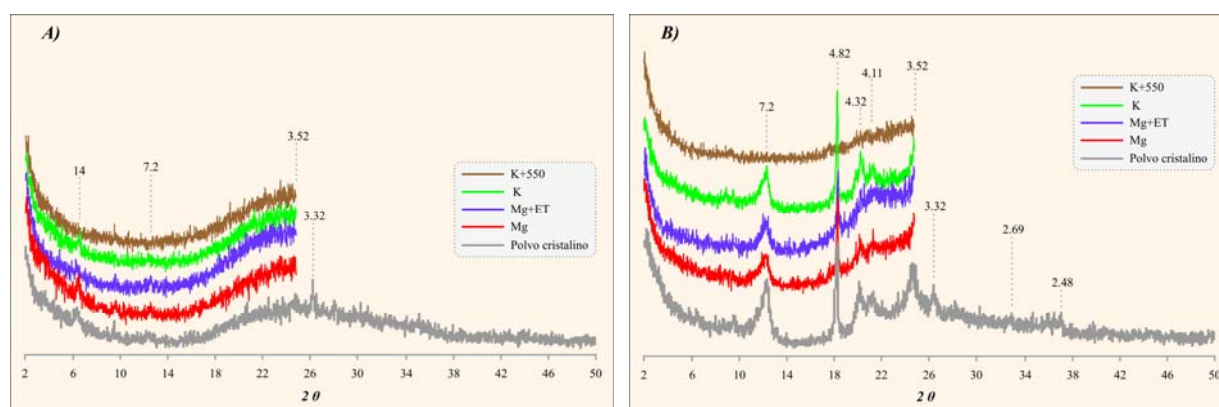


Fig. 9. Difractogramas de RX correspondientes a uno de los perfiles de suelos desarrollados a partir de gabros: A) horizonte  $Ah_1$  y B) horizonte C de Val do Dubra. Los espaciados se expresan en Å.

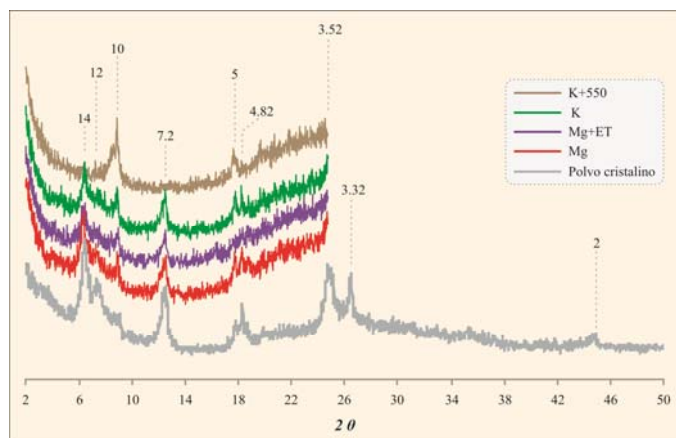
La presencia de goethita en el horizonte C (Fig. 9 B), tal y como se mencionó anteriormente, sugiere que tienen su origen a partir de la meteorización de los elementos ferromagnesianos presentes en el material de partida. Sin embargo, la ausencia de este mineral en el horizonte superficial (Fig. 9 A) no quiere decir que no existan oxi-hidróxidos de Fe sino que éstos se encuentran en forma amorfa formando parte de complejos con la materia orgánica.

Se ha destacar la ausencia de difracciones a 3,18 Å características de las plagioclasas, uno de los constituyentes fundamentales de las rocas gabroideas, lo que pone de manifiesto la gran alterabilidad de este tipo de materiales.

### 3.4.5. Mineralogía de Suelos sobre Gneis

En la Fig. 10 se representan los patrones de difracción de RX correspondientes al horizonte más superficial del perfil de Península de Masanteo (gneis). Al igual que los perfiles desarrollados a partir de anfibolitas, granulitas y gabros, el perfil de Península de Masanteo presenta un alto grado de amorficidad, característica propia de los suelos desarrollados a partir de este tipo de materiales en condiciones de buen drenaje y bajo unas condiciones de temperatura y precipitación que favorecen los procesos de meteorización. Esto

concuera con los resultados obtenidos en las extracciones selectivas de  $Al_p$  y  $Al_o$ , cuya relación, próxima a 1 (0,9, Tabla 1), indica que casi la totalidad del Al se encuentra formando parte de complejos Al-humus.



*Fig. 10. Difractogramas de RX correspondientes a al horizonte superficial del perfil de Península de Masanteo, desarrollado a partir de gneis. Los espaciados se expresan en Å.*

Además de la fracción amorfa, los patrones de difracción de RX muestran la presencia de otras especies minerales como illita (efectos a 10, 5 y 2 Å), vermiculita (efectos a 14 Å en todos los agregados salvo en el calcinado a 550 °C en el que colapsa a una banda más o menos amplia en torno a 10 Å), intergrados clorita-vermiculita (parte del efecto a 14 Å junto con el efecto a 12 Å, observado en el agregado orientado calcinado a 550 °C), caolinita (efectos a 7,2 Å, que desaparece en el agregado calcinado a 550 °C, y 3,52 Å), posiblemente originada como producto del proceso de caolinitización de la illita (Biotita), cuarzo (efectos a 3,32 y 2,48 Å) y trazas de gibbsita (efectos a 4,82 y 4,32 Å), generada, posiblemente, como consecuencia del proceso de desilificación de la caolinita que se produce en condiciones de buen drenaje, favorecido por la textura franco-arenosa del perfil, y bajo condiciones de temperatura y precipitación que favorecen los procesos de meteorización (ver epígrafe de clima) y con ellos la liberación de Si (Luciuk y Huang, 1974; Huang y col., 2002).

#### **3.4.6. Mineralogía de Suelos sobre materiales esquistosos**

Los patrones de difracción de RX correspondientes a los perfiles de suelos desarrollados a partir de esquistos (Fig. 11) muestran un alto grado de cristalinidad. Al igual que en los suelos serpentínicos ubicados en la zona más árida de Portugal, gran parte de los efectos de difracción observados en los agregados orientados de los perfiles de suelos sobre esquistos probablemente se deba a la fracción limosa. Dado que se trata de suelos con un escaso desarrollo y escasamente meteorizados como consecuencia de las altas temperaturas y la escasa precipitación, es muy posible que durante la extracción de la fracción arcilla empleada para la elaboración del estudio mineralógico haya sido sobrevalorada al incluir dentro de ésta la fracción de limo fino, lo que explicaría la alta definición de los picos de difracción y el alto grado de cristalinidad de las muestras.



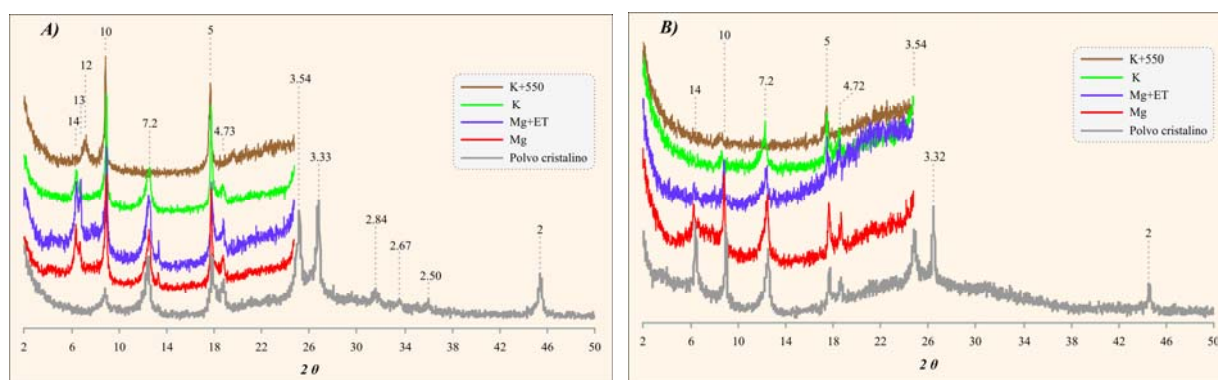


Fig. 11. Difractogramas de RX correspondientes a dos perfiles desarrollados a partir de esquistos: A) horizonte A del perfil de Adegahna; y B) A del perfil de Gouveia. Los espaciados se expresan en Å.

En cualquier caso, los difractogramas de RX muestran la presencia de grandes cantidades de illita (efectos a 10, 5 y 2 Å) en todos los perfiles, principalmente en los perfiles de Adegahna (Fig. 11 A) y Sendim da Serra (Fig. 31 A y B, Anexo 4) y en menor medida en el perfil de Gouveia (Fig. 11 B). También se observa la presencia de clorita (efectos a 14, 7, 4,72 y 3,52 Å), sobre todo en el horizonte subsuperficial de Sendim da Serra (Fig. 31 B, Anexo 4), intergradados clorita-vermiculita (parte del efecto a 14 Å junto con el efecto a 12 Å, observado en el agregado orientado calcinado a 550 °C), más abundantes en el horizonte superficiales de Adegahna (Fig. 11 A), vermiculita (efectos a 14 Å en todos los agregados salvo en el calcinado a 550 °C en el que colapsa a una banda más o menos amplia en torno a 10 Å), en todos los perfiles aunque con cantidades mayores en el de Sendim da Serra (Fig. 31, Anexo 4) y en horizonte superficial de Adegahna (Fig. 11 A), caolinita (efectos a 7,2 Å, que desaparece en el agregado calcinado a 550 °C, y 3,52 Å), componente mineralógico especialmente abundante en el perfil de Sendim da Serra (Fig. 31, Anexo 4) y cuarzo (efectos a 3,32 y 2,48 Å).

### 3.5. Propiedades Ándicas y Clasificación de Suelos

Según lo establecido por la *World Reference Base* (WRB) (FAO, 2006), para clasificar un suelo como Andosol éste ha de cumplir una serie de requisitos indispensables, que son:

- \* *Tener uno o más horizontes con propiedades ándicas o vítricas con un espesor combinado de: i) 30 cm o más dentro de los 100 cm superficiales y comenzando dentro de los 25 cm superficiales; o ii) 60 % o más del espesor total del suelo, cuando hay roca continua o un horizonte cementado o endurecido entre los 25 y 50 cm a partir de la superficie; y*
- \* *Inexistencia de un horizonte árgico, ferrálico, petroplántico, plántico o espódico (a menos que estén enterrados a más de 50 cm).*

Tabla 3.- Resultados analíticos para la determinación de Propiedades Ándicas según la WRB (FAO, 2006).

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H.	PROF.	HUMEDAD (%)		DENS. (kg/dm³)		Al <sub>2</sub> +1/2Fe <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub>	CIC	V	C <sub>r</sub>	Rete. PO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	I.M.	DOEO	Ret. de agua (%)		
			(cm)	C.C <sup>†</sup>	S.S <sup>‡</sup>	C.C	S.S	%	%	%	cmol <sub>c</sub> , kg <sup>-1</sup>	%	%	10 kPa			1500 kPa		
GABRO	Val do Dubra	Ah1	0-35	12.5	2.4	0.68	0.66	2.6	0.55	0.78	12	2.5	8.8	97.6	1.74	0.493	99.25	43.64	
		Ah2	50-80	26.2	15.8	0.57	0.48	4.5	0.20	1.34	14.4	3.1	7.1	98.3	1.67	0.487	80.97	43.23	
		B	80-100	9.0	1.1	1.19	1.17	1.0	0.86	0.10	5.1	16.4	1.0	72.7	1.79	0.079	-	-	
		C	100-200	12.7	2.9	0.90	0.88	0.7	0.91	0.11	6.0	52.9	0.3	63.8	1.13	0.049	-	-	
	F. P. Cabaleira	A	0-35	22.7	3.6	0.55	0.53	3.6	0.67	0.46	12.5	3.2	10.9	98.1	1.68	0.857	84.24	52.43	
		BA	35-90	19.4	2.0	1.17	1.14	0.5	0.84	0.05	4.0	17.6	0.4	53.6	1.64	0.045	-	-	
	L. P. Cabaleira	2BC	90-130	21.8	1.9	1.13	1.11	0.5	0.67	0.06	7.2	14.7	0.2	64.0	1.50	0.026	-	-	
		Ah1	0-30	11.9	6.8	0.47	0.44	3.5	0.78	0.26	21.2	6.7	18.3	96.5	1.79	0.905	82.78	67.43	
		Ah2	30-80	25.8	4.4	0.55	0.52	2.9	0.88	0.21	22.8	3.5	16.4	96.2	1.79	0.707	74.05	61.59	
		Ah3	80-150	28.5	3.6	0.64	0.62	3.2	0.12	0.23	19.1	1.4	14.3	97.6	1.71	0.554	89.99	53.08	
ANFIBOLITA	E. Mera I	Ah4	150-200	28.3	8.1	0.83	0.76	4.0	0.48	0.45	13.4	1.7	9.3	97.1	1.71	0.462	78.55	42.57	
		Ah1	0-20	24.4	5.3	0.92	0.87	1.5	0.56	0.20	9.5	2.0	4.3	81.2	1.75	0.227	-	-	
		Ah2	20-60	25.8	5.8	0.86	0.81	1.7	0.65	0.20	8.8	3.1	5.2	85.5	1.75	0.259	60.28	19.52	
		Ah3	60-80	29.5	6.9	0.81	0.75	1.9	0.97	0.09	9.7	2.4	5.7	86.3	1.74	0.425	-	-	
	E. Mera II	AB	80-105	27.0	4.1	0.76	0.73	2.0	0.94	0.11	8.5	2.4	4.1	78.8	1.76	0.291	-	-	
		B	>105	22.4	7.2	0.84	0.78	1.6	0.99	0.14	5.5	2.3	1.3	80.8	1.86	0.134	-	-	
		A	0-40	20.0	5.7	0.73	0.68	1.4	0.87	0.14	7.1	5.0	4.4	84.1	1.78	0.278	-	-	
		B	40-82	16.0	4.6	1.19	1.13	1.3	0.84	0.07	4.6	9.1	1.0	67.7	1.75	0.089	-	-	
	Xinzo	B2	82-150	14.3	2.1	1.32	1.30	0.6	0.61	0.04	2.0	14.4	0.2	31.5	1.05	0.033	-	-	
		B3	150-180	13.2	3.3	1.33	1.29	0.6	0.99	0.04	3.4	10.9	0.3	41.7	1.79	0.055	-	-	
		Ah1	0-20	13.3	5.4	0.74	0.70	2.1	0.97	0.19	11.8	3.9	9.1	93.9	1.76	0.554	71.02	53.52	
		Ah2	20-60	14.7	5.5	0.73	0.69	2.4	0.93	0.20	14.9	1.4	9.2	95.5	1.71	0.565	83.02	46.16	
	Monte Castro I	B	60-80	7.5	4.1	1.12	1.08	0.9	0.95	0.05	5.0	3.9	1.2	61.8	1.83	0.118	-	-	
		CB	80-120	12.5	3.9	1.25	1.20	0.7	0.98	0.06	5.3	3.5	0.5	53.1	2.14	0.065	-	-	
		A	0-28	3.1	8.6	0.93	0.85	1.5	0.99	0.16	10.7	7.2	6.6	84.1	1.75	0.401	62.64	32.76	
		2BC	28-128	16.4	3.5	1.23	1.19	0.5	0.96	0.08	5.2	3.0	0.3	58.3	2.75	0.050	-	-	
	Monte Castro II	2C	>128	-	-	-	-	0.3	0.82	0.06	4.6	5.5	0.2	41.5	2.00	0.045	-	-	
		A	0-35	17.6	8.1	0.74	0.68	2.1	0.84	0.13	16.7	6.8	9.3	94.5	1.81	1.054	67.11	35.32	
BC		35-75	-	-	-	-	1.8	0.78	0.06	4.2	3.1	1.3	77.8	2.43	0.248	-	-		
AR		0-10	12.4	3.4	0.89	0.86	2.9	0.48	0.56	12.6	16.5	9.0	96.3	1.77	0.659	-	-		
SERPENTINA	Goiás I	Ah	0-40	7.7	5.0	0.81	0.77	3.0	0.14	0.57	15.0	19.6	8.6	95.1	1.77	0.583	76.54	57.61	
		AB	40-60	16.7	2.7	0.78	0.76	2.7	0.54	0.47	7.8	6.8	5.4	95.9	1.69	0.609	73.96	46.96	
	Goiás II	C	60-200	17.4	2.1	0.83	0.81	0.6	0.98	0.05	6.6	5.1	0.6	65.2	2.09	0.106	-	-	
		A	0-40	17.3	2.2	0.90	0.89	2.0	0.83	0.24	12.0	9.8	9.0	90.1	1.80	0.551	60.97	49.40	
	Coristanco	B	40-70	12.2	1.4	1.02	1.01	0.9	0.72	0.14	5.1	7.2	1.1	77.7	2.01	0.095	-	-	
		CB	70-100	3.1	1.6	1.47	1.45	0.7	0.60	0.11	4.2	12.3	0.6	62.0	2.48	0.122	-	-	
	Breixa	Ah1	0-20	9.6	5.2	0.76	0.72	1.3	1.00	0.21	9.8	6.9	7.1	91.6	1.78	0.775	-	-	
		Ah2	20-55	6.9	4.2	1.04	1.00	1.8	0.72	0.43	6.9	2.4	3.4	90.8	1.63	0.323	-	-	
	A Golada	B	55-94	10.1	7.2	1.09	1.01	0.8	0.97	0.08	4.8	11.1	0.5	54.8	1.81	0.082	-	-	
		C	>94	14.5	17.2	0.85	0.70	0.4	0.84	0.06	5.7	50.4	0.2	52.1	0.34	0.026	-	-	
	GRANULITA	Melide	Ap1	0-35	6.9	5.0	0.95	0.91	1.1	0.90	0.07	6.2	14.0	2.2	57.6	1.76	0.213	-	-
			Ap2	35-55	9.4	5.5	1.08	1.02	1.3	0.97	0.07	6.0	12.1	2.5	67.4	1.74	0.258	-	-
		Vilouriz	A	0-10	9.6	5.3	0.95	0.90	1.5	0.91	0.11	7.4	24.4	4.1	75.5	1.77	0.194	-	-
			B	10-40	12.2	9.4	1.06	0.96	1.3	1.00	0.15	8.8	79.7	1.1	68.4	1.98	0.108	-	-
		Pena Armada	C	40-60	11.4	7.5	0.94	0.87	0.9	0.72	0.19	10.1	88.6	0.4	55.9	1.85	0.071	-	-
			A	0-30	6.5	6.7	0.90	0.84	1.2	0.49	0.10	8.8	70.3	5.3	47.0	1.70	0.146	-	-
		Campo Marzo	B	30-45	3.0	3.9	1.08	1.04	0.7	0.45	0.09	5.3	82.5	2.0	32.7	1.67	0.107	-	-
			CB	>45	0.7	3.4	1.17	1.13	0.4	0.42	0.09	5.4	71.6	0.6	25.2	2.00	0.047	-	-
Morais I		A	0-25	13.9	4.9	0.78	0.74	1.6	0.55	0.12	7.7	63.8	7.0	64.6	1.85	0.214	77.01	47.27	
		Cg	25-47	-	-	-	-	0.4	0.34	0.04	7.5	91.2	0.8	18.0	2.18	0.045	-	-	
Morais II		A	0-40	3.2	4.5	0.93	0.89	0.7	0.79	0.11	4.6	51.7	2.3	41.7	1.94	0.129	45.63	12.80	
		B	40-100	3.0	1.8	0.99	0.97	0.5	0.96	0.05	4.1	26.5	0.9	52.1	1.98	0.086	-	-	
Limões		Ap	0-20	0.9	0.8	1.22	1.20	0.3	0.92	0.06	6.2	69.3	0.4	13.4	1.64	0.047	-	-	
		A	0-20	1.2	0.7	0.94	0.93	0.3	0.58	0.04	7.9	77.2	1.3	17.0	1.60	0.053	-	-	
Bragança		B	20-40	1.1	1.6	1.03	1.02	0.2	0.26	0.06	7.7	92.6	1.1	13.5	1.92	0.049	-	-	
		A	0-10	1.3	1.4	0.92	0.90	0.5	0.23	0.11	6.4	62.8	1.0	24.1	1.62	0.066	-	-	
A Soeira		A	0-10	1.0	1.4	0.76	0.74	0.5	0.71	0.04	7.2	71.9	2.0	23.0	1.78	0.141	-	-	
		A	0-10	0.89	0.58	0.97	0.96	0.4	0.34	0.05	4.4	87.7	1.1	20.7	1.73	0.090	-	-	
ESQUISTO	Mirador Capelada	Ah1	0-30	31.5	6.2	0.81	0.76	2.1	0.96	0.04	11.4	4.7	9.7	93.8	1.68	0.834	37.90	17.26	
		Ah2	30-70	22.2	8.8	1.16	1.06	2.1	0.98	0.15	9.3	1.7	5.6	89.6	1.69	0.554	-	-	
	Forte Vello	Ap1	0-30	10.9	3.5	0.84	0.81	1.5	0.73	0.10	9.0	40.6	3.1	61.7	1.78	0.276	-	-	
		Ap2	30-100	14.0	4.2	0.94	0.90	1.7	0.60	0.11	9.6	11.6	2.9	62.1	1.74	0.296	-	-	
GNEIS	Adegahna	Ap3	100-210	21.7	7.4	1.25	1.16	2.0	0.63	0.13	10.1	4.2	2.6	72.8	1.69	0.309	55.67	14.32	
		A	0-20	0.9	1.0	1.12	1.11	0.2	0.68	0.01	3.9	34.9	1.2	6.8	1.44	0.040	-	-	
	Gouveia	A	0-10	0.7	0.8	1.24	1.23	0.2	0.45	0.02	2.4	76.1	1.1	5.9	1.07	0.049	-	-	
		A	0-20	1.2	0.8	1.25	1.24	0.4	0.25	0.02	3.4	83.7	0.7	12.9	1.76	0.049	-	-	
P. Masanteo	B	20-60	0.8	0.5	1.13	1.13	0.3	0.97	0.02	3.2	56.5	0.4	17.4	1.48	0.054	-	-		
	Ah	0-20	14.7	5.8	0.91	0.86	1.8	0.91	0.14	14.2	4.4	8.5	88.0	1.70	0.389	62.40	38.38		
	BC	20-50	19.8	6.9	0.80	0.75	1.7	0.97	0.11	12.7	3.6	7.8	83.1	1.68	0.419	-	-		
	C	50-110	-	-	-	-	0.5	0.95	0.06	4.1	5.1	0.5	29.6	1.47	0.029	-	-		

Tabla 4.- Clasificación de los perfiles estudiados según la WRB (FAO, 2006) y ST (Soil Survey Staff, 2006).

Material de Partida	Perfil	Clasificación según la WRB (2006)	Clasificación según la ST (2006)
<b>ANDOSOLES</b>			
<b>Gabro</b>	Val do Dubra	Andosol Fulvi-silándico (acróxico, dístrico)	Fulvudand Páchico
	F. P. Cabaleira	Andosol Melani-aluándico (acróxico, dístrico)	Melanudand Típico
	L. P. Cabaleira	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Páchico
<b>Anfibolita</b>	E. Mera I	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Típico
	Xinzo	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Típico
	M. Castro II	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Típico
	Goias II	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Típico
	Coristanco	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico)	Fulvudand Típico
<b>Granulita</b>	M. Capelada	Andosol Melani-aluándico (dístrico)	Melanudand Páchico
<b>UMBRISOLES</b>			
<b>Anfibolita</b>	M. Castro I	Umbrisol Cámbico Háplico (húmico, alúmico, hiperdístrico)	Distrudept Húmico
	Breixa	Umbrisol Ándico (húmico, alúmico, pachic, láxico, arénico)	Distrudept Ándico
	Agolada	Umbrisol Háplico (húmico, alúmico, páchico)	Distrudept Húmico Páchico
<b>Granulita</b>	Forte Vello	Umbrisol Háplico (húmico, alúmico, dístrico, páchico, láxico)	Haplantrept Típico Páchico
<b>Gneis</b>	P. Masanteo	Umbrisol Ferrali-ándico (húmico, alúmico, hiperdístrico, arénico)	Distrudept Ándico
<b>Serpentina</b>	Melide	Umbrisol Cámbico	Dystrudept Lítico
	Vilouriz	Umbrisol Endogleyico	Dystrudept Ácuico Húmico
<b>CAMBISOLES</b>			
<b>Serpentina</b>	Melide	Cambisol Léptico	Dystrudept Lítico
	Campo Marzo	Cambisol Ferrálico	Dystrudept Óxico
	Morais II	Cambisol Léptico(éutrico)	Haploxerept Lítico
<b>Esquisto</b>	Sendim da Serra	Cambisol Háplico	Haplaxerept Lítico
<b>LEPTOSOLES</b>			
<b>Anfibolita</b>	Goias I	Leptosol Andi-lítico (dístrico)	Udipsamment Lítico
<b>Serpentina</b>	Morais I	Leptosol Lítico (éutrico)	Xeropsamment Lítico
	Limãos	Leptosol Lítico (éutrico)	Xerorthent Lítico
	Bragança	Leptosol Lítico (éutrico)	Xerorthent Lítico
	A Soeira	Leptosol Lítico (éutrico)	Xerorthent Lítico
<b>Esquisto</b>	Adegahna	Leptosol Lítico (éutrico)	Xerorthent Lítico
	Gouveia	Leptosol Lítico (éutrico)	Xerorthent Lítico
<b>FERRALSOLES</b>			
<b>Anfibolita</b>	E. Mera II	Ferralsol Vetí-úmbrico (húmico, alúmico, dístrico, xántico)	Xanthic Hapludox

Dado que los suelos objeto de estudio presentan materiales de partida no volcánicos, las propiedades vítricas no se tendrán en cuenta. Solamente se describirán las propiedades ándicas, definidas por la WRB como:

\* Un índice  $Al_o + 1/2Fe_o$  con un valor de 2,0 % o más; y

\* Una densidad aparente de 0,90 kg dm<sup>-3</sup> o inferior; y

- \* Una retención de fosfatos del 85 % o más; y
- \* Menos del 25 % (en masa) de carbón orgánico.

Por otra parte, se establece una diferenciación entre propiedades sil-ándicas, cuando el contenido en  $Si_o$  es de 0,6 % o superior o la relación  $Al_p/Al_o$  es inferior a 0,5, y alu-ándicas, cuando el contenido en  $Si_o$  es inferior al 0,6 % o superior o la relación  $Al_p/Al_o$  igual o superior a 0,5. De acuerdo con Poulenard y Herbillon (2000) se puede dar el caso de la existencia de propiedades intermedias, propiedades alu-sil-ándicas, cuando el contenido en  $Si_o$  tiene valores entre 0,6 y 0,9 % y una relación  $Al_p/Al_o$  entre 0,3 y 0,5.

En las Tablas 3 y 4 se exponen los datos analíticos utilizados para la determinación de propiedades ándicas y la clasificación de los perfiles estudiados, en función de los criterios especificados por la WRB (FAO, 2006), respectivamente. Se han encontrado diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los valores del índice  $Al_o+1/2Fe_o$ , de horizontes superficiales (A y AB), de suelos sobre gabros (4,5 % en el horizonte  $Ah_2$  de Val do Dubra, Tabla 3), anfíbolitas (3,0 % en el horizonte Ah de Goias II, Tabla 3) y granulitas (2,1 % en los horizontes  $Ah_1$  y  $Ah_2$  de Mirador da Capelada, Tabla 3) y los correspondientes a los restantes grupos de suelos (con máximos que oscilan entre el 0,2 % de Adegahna, esquisto, y el 1,6 % del horizonte A de Pena Armada, Tabla 3). También se han encontrado diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre los valores de retención de fosfatos y C orgánico en los mismos grupos de suelos, con valores especialmente altos en suelos sobre gabros (retención de fosfatos: 96,2-98,3 %; C orgánico: 7,1-18,3 %; Tabla 3).

Estos valores altos del índice  $Al_o+1/2Fe_o$ , siempre superiores al 2%, en combinación con las características de color (ver epígrafe descripción de suelos), profundidad, mayor o igual a 30 cm, retención de fosfatos, superior al 90 %, densidad, inferior o igual a  $0,9 \text{ kg dm}^{-3}$  y un contenido en C orgánico inferior al 25 % (Tabla 3), conducen a la que la totalidad de los suelos desarrollados sobre gabros y la mayor parte de los suelos desarrollados sobre anfíbolitas, a excepción del perfil de Goias II, Estación de Mera II, Monte Castro I, Breixa y Agolada, y granulitas, a excepción del perfil de Forte Vello, cumplan todos los criterios para propiedades ándicas y puedan ser clasificados como Andosoles (FAO, 2006) (Tabla 4). El perfil de Goias II, a pesar de cumplir todos los criterios para propiedades ándicas, no puede ser clasificado como Andosol al no cumplir los requerimientos mínimos de espesor (0-10 cm, Tabla 3), por lo que se incluye dentro del grupo de los Leptosoles (FAO, 2006) e Entisoles (SSS, 2006) de carácter ándico (Tabla 4). Por otra parte, los perfiles de Breixa, que no cumple el criterio del índice  $Al_o+1/2Fe_o$  (1,3-1,8 %, Tabla 3), y Estación de Mera II, Monte Castro I y Agolada, que no cumplen ninguno de los criterios de propiedades ándicas salvo el contenido en C orgánico (Estación de Mera II: 4,4; Monte Castro I: 6,6 %; Agolada: 2,2-2,5 %; Tabla 3), todos ellos desarrollados a partir de anfíbolitas, tampoco pueden ser clasificados como Andosoles, si bien, la presencia de un horizonte ferrálico, en el perfil de Estación de Mera II, y un horizonte úmbrico, en los restantes, posibilita su inclusión dentro de los grupos de Ferralsoles/Oxisoles y Umbrisoles/Inceptisoles, en el que también se incluye el perfil de Península de Masanteo (gneis) (Tabla 4), respectivamente.

Los bajos porcentajes de  $Si_o$ , junto con los altos valores de  $Al_p/Al_o$ , indicando el predominio de complejos Al-humus, en la mayor parte de los suelos clasificados como Andosoles (Tabla 4), inferiores a 0,5 % (Tabla 3)

conduce a que éstos sean mayoritariamente de carácter alu-ándico (Tabla 4). Sin embargo, el perfil de Val do Dubra presenta unos porcentajes de  $Si_o$  (Tabla 3) significativamente superiores ( $P < 0,01$ ) a los hallados en los restantes Andosoles. Este hecho hace que éste sea el único perfil de carácter sil-ándico (Tabla 4). Por otra parte, los valores obtenidos para el índice melánico, generalmente mayores a 1,70 (Tabla 3) indican la existencia de un horizonte fúlvico en la mayor parte de los suelos ándicos (Tabla 4), salvo en los perfiles de Fonte de Pena Cabaleira (gabro) y Mirador da Capelada (granulita) en los que los valores del índice melánico ( $< 1,70$ ; Tabla 3) indican la presencia de un horizonte melánico. Tanto los horizontes fúlvicos como los melánicos se caracterizan por su color oscuro y por estar asociados a minerales de bajo grado de orden, como el alofano, y complejos organoaluminicos (FAO, 2006) que contribuyen, en conjunto, a estabilizar la fracción orgánica de los suelos que los contienen (Higashi, 1983) y justificando, de este modo, las diferencias entre los contenidos en C orgánico de suelos ándicos y los restantes grupos de suelos.

Los suelos sobre materiales serpentínicos y esquistosos se caracterizan por su escaso espesor, que generalmente no supera los 60 cm (Tabla 3), una alta densidad y la inexistencia de horizontes úmbricos, como consecuencia de la escasez de material orgánico. Todo ello en conjunto conduce a su clasificación como Leptosoles háplicos (Melide, Morais I y II, Sendim da Serra; Tabla 4), aquellos que a parte de su escaso espesor

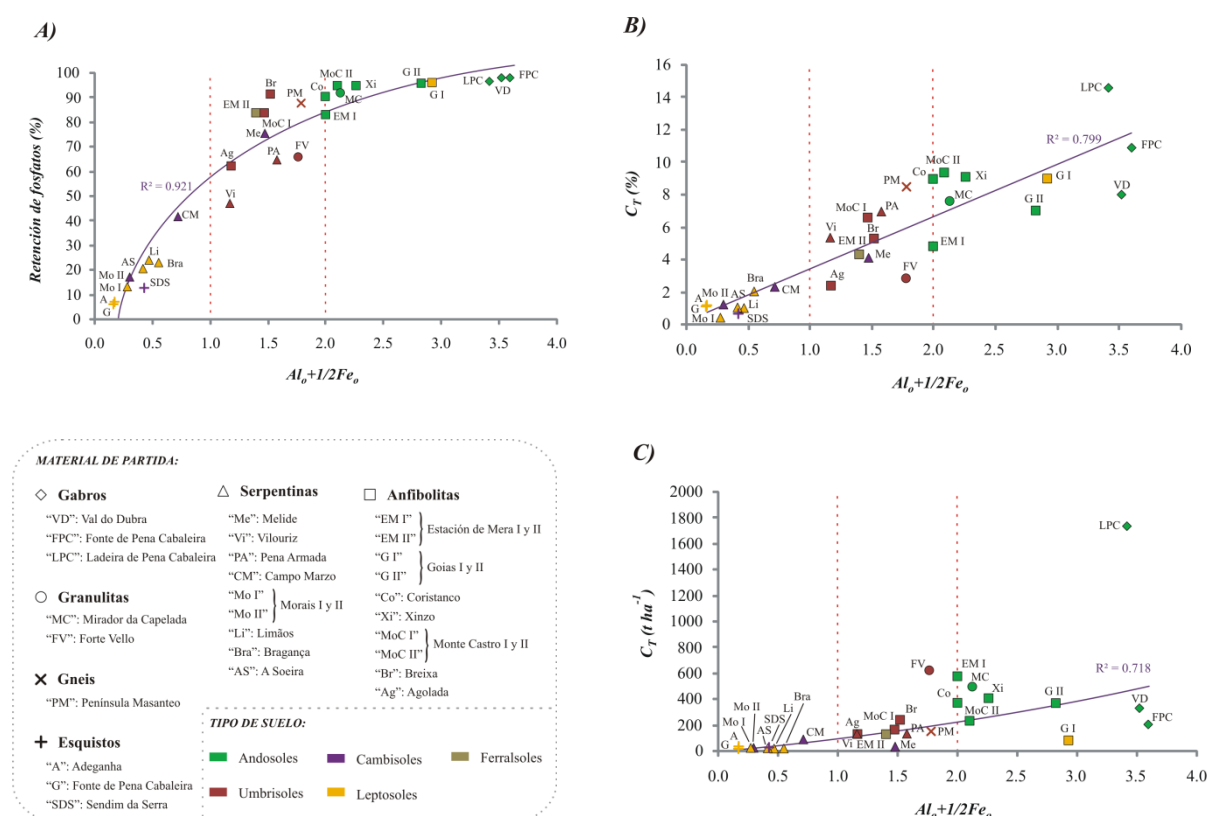


Fig. 12. Relaciones entre el índice  $Al_o + 1/2Fe_o$  y A) Retención de fosfatos (%); y B) el contenido en C orgánico (%) y C) el contenido de C orgánico ( $t\ ha^{-1}$ ). Se corresponden con los valores medios para cada perfil, salvo para el caso del C orgánico expresado en  $t\ ha^{-1}$  que se corresponde con el sumatorio, teniendo en cuenta solamente los horizontes A y AB.



no presentan ninguna otra característica de diferenciación, Leptosoles líticos (Limãos, Bragança, A Soeira, Gouveia; Tabla 4), los que tienen roca continua en los 10 primeros centímetros de profundidad, o Leptosoles mólicos (Vilouriz, Pena Armada, Campo Marzo, Adegahna; Tabla 4), cuando presentan una CIC mayor de 50  $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ .

Se han encontrado correlaciones muy buenas entre diferentes propiedades ándicas y entre éstas y algunas propiedades del suelo, como la capacidad de retención de agua. La Fig. 12 A muestra que la retención de fosfatos está fuertemente relacionada con los valores del índice  $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$  ( $R^2 = 0.903$ ;  $P < 0,01$ ), lo que pone de manifiesto la estrecha relación que existe entre la retención de fosfatos y las cantidades de formas de Al y Fe no cristalinas presentes en el suelo. De esta forma, son los suelos ándicos desarrollados sobre gabros, con valores seguidos de los desarrollados en anfibolitas y granulitas, con valores medios de  $\text{Al}_0$  13,2 y 10,5  $\text{g kg}^{-1}$  (Tabla 1), los que presentan una mayor capacidad de retención de fosfatos (Fig. 12 A). Desde el punto de vista agronómico es muy importante conocer la capacidad de retención de fosfatos que posee el suelo, pues es un valor crítico que puede ser utilizado para determinar los niveles de aplicación de fertilizantes fosforados en los suelos de cultivo (Shoji y col., 1996).

También se ha visto una buena correlación ( $R^2 = 0.840$ ;  $P < 0,01$ ) entre los valores de  $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$  y la cantidad de C orgánico acumulado en el suelo (Fig. 12 B). Al igual que sucedía en el caso anterior, a medida que aumenta el índice  $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$  también lo hace la cantidad de C orgánico presente. De esta forma, suelos ándicos o con propiedades ándicas sobre gabros, anfibolitas y granulitas son los que presentan un mayor contenido en C orgánico (Fig. 12 B). Esto no hace más que confirmar el hecho de que la presencia de minerales de bajo grado de orden junto con formas de Al reactivas, confiere un mayor grado de estabilidad a la fracción orgánica del suelo (Martin y Haider, 1986; Aran y col., 2001), incrementando de igual manera el tiempo medio de residencia (Torn y col., 1997; Parfitt y col., 2002).

En síntesis, considerando que el criterio que mejor representa el estado de las propiedades ándicas es el índice  $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$ , se observa que las situaciones que permiten la formación de suelos que superan el valor de definición de los Andosoles ( $> 2\%$ ) sólo se presentan cuando existe una combinación de suelos desarrollados sobre una roca básica (anfibolitas, gabros, granulitas o gneises básicos), sólo en horizontes A (con mayor posibilidad en los horizontes Ah2 frente a los Ah1) o AB, y el régimen hídrico es de carácter údico. El carácter xérico elimina por completo cualquier posibilidad de alcanzar valores de  $\text{Al}_0+1/2\text{Fe}_0$  próximos a 1,0, como lo demuestra el hecho de que partiendo de rocas de composición básica o ultrabásica en los suelos de Portugal este índice nunca supera 0,5 %. Dentro de las condiciones údicas, reducen o eliminan la importancia del carácter ándico las siguientes condiciones: i) roca serpentizada, si bien, algunos horizontes desarrollados sobre estos materiales pueden llegar a presentar valores superiores a 1,0, lo que podría explicarse porque se trate de rocas escasamente serpentizadas o con una serpentización puntual, asociada a los planos de figuración; ii) hidromorfia; iii) grado de evolución edáfica muy avanzado, cuando se trata de Ferralsoles (Estación de Mera II) o de suelos con B cámbico muy rico en óxidos de Fe cristalinos con carácter ferrálico (Campo Marzo); iv) cultivo, caso de los perfiles de Forte Vello y Agolada, aunque éste último presenta en la actualidad vegetación forestal fue anteriormente cultivado.

**Tabla 5.-** Valores del Índice  $Al_o + 1/2Fe_o$  correspondientes a los horizontes superficiales A y subsuperficiales B y AB de los perfiles estudiados. Relación con el material de partida y clasificación.

Perfil	Litología	Clasificación	H.	$Al_o + 1/2Fe_o$ (%)
Val do Dubra	Gabro	Andosol Fulvi-silándico (acróxico, dístrico) // Fulvudand Páchico	Ah1	2,6
			Ah2	4,5
			B	1,0
F. P. Cabaleira	Gabro	Andosol Melani-aluándico (acróxico, dístrico) // Melanudand Típico	A	3,6
			BA	0,5
L.P. Cabaleira	Gabro	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Páchico	Ah1	3,5
			Ah2	2,9
			Ah3	3,2
			Ah4	4,0
E. Mera I	Anfibolita	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Típico	Ah1	1,5
			Ah2	1,7
			Ah3	1,9
			BA	2,0
E. Mera II	Anfibolita	Ferralsol Vetí-úmbrico (húmico, alúmico, dístrico, xántico) // Xanthic Hapludox	A	1,4
			B1	1,3
			B2	0,6
			B3	0,6
Xinzo	Anfibolita	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Típico	Ah1	2,1
			Ah2	2,4
			B	0,9
M. Castro I	Anfibolita	Umbrisol Cámbico (húmico, alúmico, hiperdístrico) // Dystrudept Húmico	A	1,5
M. Castro II	Anfibolita	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Típico	A	2,1
Goias I	Anfibolita	Leptosol Andi-lítico (dístrico) // Udipsamment Lítico	A	2,9
Goias II	Anfibolita	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Típico	A	2,0
			B	0,9
Coristanco	Anfibolita	Andosol Fulvi-aluándico (dístrico) // Fulvudand Típico	A	2,0
			B	0,9
Breixa	Anfibolita	Umbrisol Ándico (húmico, alúmico, pachic, láxico, arénico) // Dystrudept Ándico	Ah1	1,3
			Ah2	1,8
			B	0,8
Agolada	Anfibolita	Umbrisol Háplico (húmico, alúmico, páchico) // Dystrudept Húmico Páchico	Ap1	1,1
			Ap2	1,3
Melide	Peridotita	Cambisol Léptico // Dystrudept Lítico	A	1,5
			B	1,3
Vilouriz	Serpentina	Umbrisol Cámbico // Dystrudept Lítico	A	1,2
			B	0,7
Pena Armada	Serpentina	Umbrisol Endogleyico // Dystrudept Ácuico Húmico	A	1,6
Campo Marzo	Serpentina	Cambisol Ferrálico // Dystrudept Óxico	A	0,7
			B	0,5
Morais I	Peridotita	Leptosol Lítico (éutrico) // Xeropsamment Lítico	Ap	0,3
Morais II	Peridotita	Cambisol Léptico(éutrico) // Haploxerept lítico	A	0,3
			B	0,2
Limões	Peridotita	Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico	A	0,5
Bragança	Metaperidotita	Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico	A	0,5
A Soeira	Metaperidotita	Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico	A	0,4
M. Capelada	Granulita	Andosol Melani-aluándico (dístrico) // Melanudand Páchico	Ah1	2,1
			Ah2	2,1
Forte Vello	Granulita	Umbrisol Háplico (húmico, alúmico, dístrico, páchico, láxico) // Haplantrept Típico Páchico	Ap1	1,5
			Ap2	1,7
			Ap3	2,0

Tabla 5.- Continuación.

Perfil	Litología	Clasificación	H.	$Al_o + 1/2Fe_o$ (%)
Adeaghna	Esquisto	Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico	A	0,2
Gouveia	Esquisto	Leptosol Lítico (éutrico) // Xerorthent Lítico	A	0,2
S. da Serra	Esquisto	Cambisol Háptico // Haploxerept Lítico	A	0,4
			B	0,3
P. Masanteo	Gneis	Umbrisol Ferrali-ándico (húmico, alúmico, hiperdístico, arénico) // Distrudept Ándico	Ah	1,8

Otro aspecto importante es que algunos suelos no cumplen con los criterios de definición para Andosoles o suelos ándicos (1 % según la [Soil Taxonomy, 1999](#)) por la falta de espesor, como es el caso de Goiás I que, sin embargo, tiene un valor de  $Al_o + 1/2Fe_o$  de 2,9. Estos resultados nos llevan a sugerir que en la clasificación de la [WRB \(2006\)](#) se debería incluir, además de la posibilidad de clasificar como Andosoles a los suelos con  $> 2$  %, con independencia de su espesor, creando una subunidad lítica, a los suelos con  $> 1$  % en subunidades ándicas, de forma similar al criterio de la [Soil Taxonomy \(1999\)](#).

El tipo de propiedades ándicas de los suelos de Galicia está relacionado con los horizontes ricos en materia orgánica con una cierta evolución. Dominan los Andosoles aluándicos, siendo bajo el porcentaje de alofanos y, por tanto, los Andosoles silándicos. Dentro de los aluándicos, son dominantes los horizontes que cumplen los requisitos de definición del horizonte fúlvico, aunque hay algunos que cumplen el criterio de melánicos y, en general las diferencias son escasas, lo que pone en entredicho la capacidad de discriminación del índice melánico, pues la mayor parte de los suelos con propiedades ándicas tienen vegetación arbórea o de matorral. Así, pues es la formación de complejos organoaluminicos reactivos, asociada a suelos con escasas transformaciones y usos poco intensivos la responsable de la mayor parte de las propiedades.

El parámetro que mejor define a los Andosoles y a los suelos con propiedades ándicas es el parámetro  $Al_o + 1/2Fe_o$ , proponiendo al igual que la Soil Taxonomy la utilización de los valores de más del 2 % (como exigencia de Andosoles) y entre 1 y 2 % para la definición de propiedades y subunidades ándicas. En la Tabla 5 se encuentran los valores de este índice para todos los horizontes, excepto los C. Se aprecia claramente que los suelos de Portugal, con un régimen de humedad xérico, tienen bajos valores ( $< 0,5$  %), aunque la litología sea similar, lo que se explica por la dificultad de formación de complejos organoaluminicos en estas condiciones de fuerte mineralización estival (la sequía favorece la cristalización) y el escaso contenido de materia orgánica. Los valores más altos ( $> 3,0$  %) se encuentran asociados a algunos horizontes A de suelos sobre gabros, quizás por la mayor alterabilidad de sus minerales o por la coincidencia en un área de fuerte pluviometría (Tabla 6) muy poco perturbada. En las anfíbolitas la variedad es mayor (valores de 1,1 a 2,9 %), similares a los de los horizontes similares de las granulitas. Sin embargo, estas diferencias litológicas se reducen si consideramos la relación entre el parámetro que valora las formas extraíbles con oxalato partido por las que se extraen con ditionito-citrato que representaría el porcentaje de las formas reactivas al total (Fig. 13 A y B). En todos los casos, el porcentaje que

refleja las formas más reactivas representa para estas rocas entre el 40 y el 75 %, para horizontes A (Fig. 13 A) y son mucho más bajos para los B (10 - 60 %) (Fig. 13 B), pero no hay diferencias entre las rocas anteriores y, curiosamente el mayor porcentaje de las formas reactivas se produce en el suelo sobre gneises a pesar de que es el que recibe la menor precipitación medida (Tabla 6), si bien la humedad relativa de la zona es muy elevada durante todo el año. Los suelos sobre esquistos y sobre serpentinas presentan valores menores del 40 % excepto el suelo que recibe la mayor cantidad de precipitación (Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente) , por lo que pudiera tratarse del efecto de la cantidad de agua sobre la meteorización o bien, lo que parece más probable que se trate de una roca metafisica ligeramente serpentinizada (Fig. 13 A y B). Consideramos que un índice relativo como el que utiliza formas reactivas frente a totales puede evidenciar más adecuadamente el carácter ándico, proponiendo que este índice supere el 50% para la definición de Andosoles y entre el 40 y el 50% para la definición de los suelos ándicos.

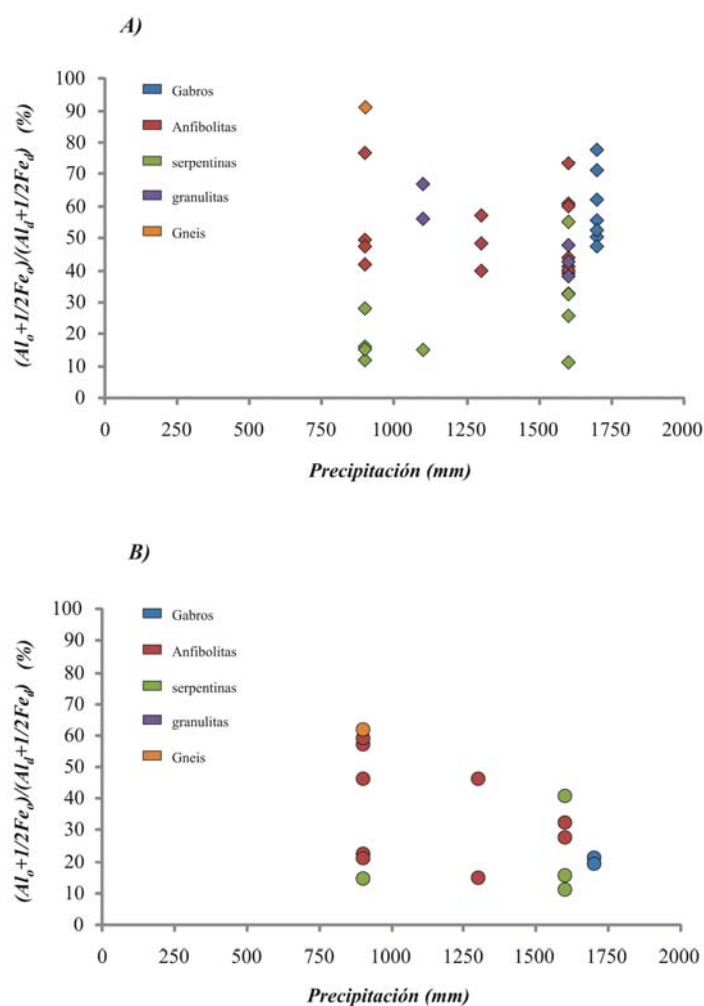


Fig. 13. Relaciones entre el índice  $(Al_o + 1/2Fe_o) / (Al_d + 1/2Fe_d)$  vs. precipitación anual media: A) Horizontes superficiales A; y B) horizontes subsuperficiales B y AB. Se han excluido los horizontes C y los perfiles de Portugal desarrollados sobre esquistos.

Se observó que la acumulación de C orgánico presenta una buena correlación ( $R^2 = 0,747$ ;  $P < 0.01$ ) con los valores obtenidos para la DOEO (densidad óptica en extracto de oxalato) (Fig. 14 A). Aunque la DOEO no es criterio según la WRB (FAO, 2006) para la determinación de propiedades ándicas, se puede utilizar para ver las tendencias en lo referente a la acumulación de C orgánico, conformando nuevamente que son los suelos ándicos o con propiedades ándicas, sobre gabros, anfíbolitas y granulitas, los que mayor acumulación de C orgánico presentan.

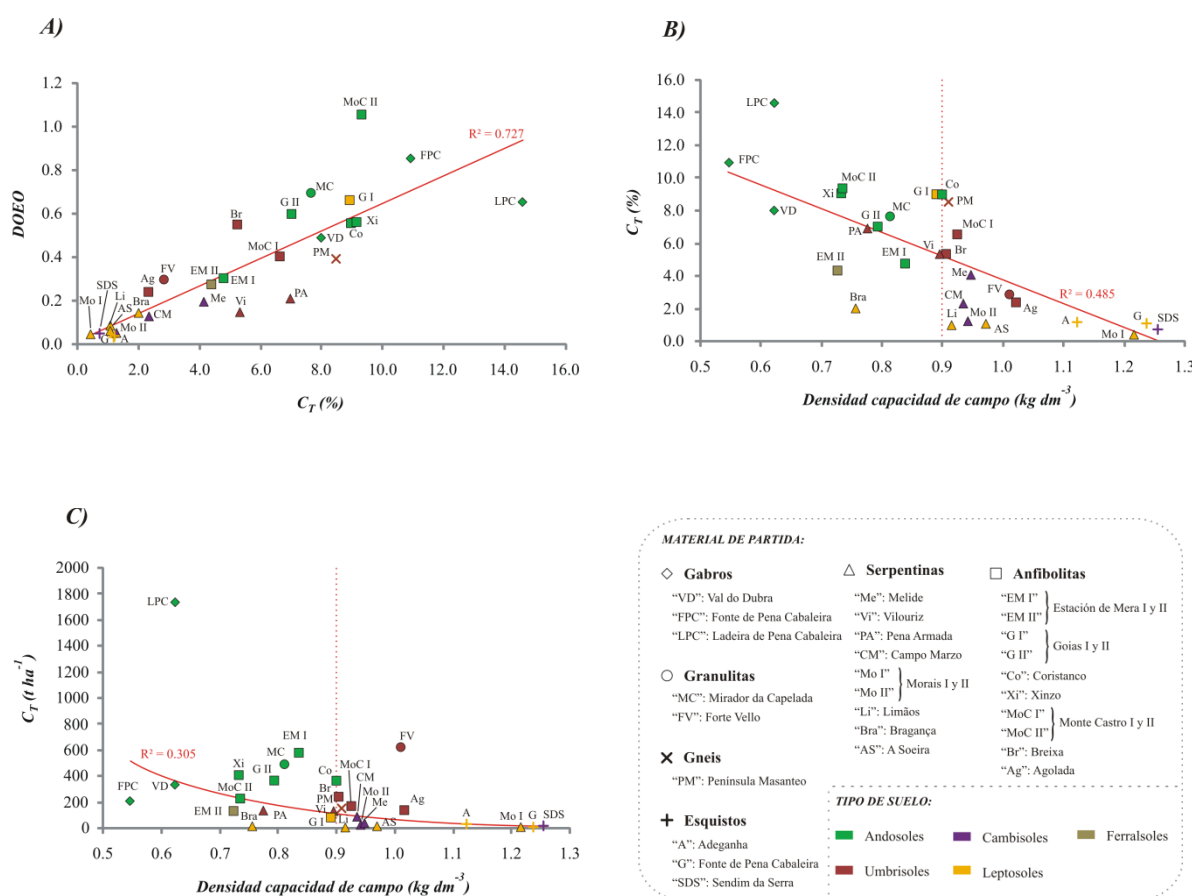


Fig. 14. Relaciones: A) contenido en C orgánico (%) vs. DOEO (densidad óptica en el extracto de oxalato); y B) Densidad del suelo a capacidad de campo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) vs. el contenido en C orgánico (%). Se corresponden con los valores medios para cada grupo de suelos teniendo en cuenta solamente los horizontes A y AB.

La acumulación de formas orgánicas en el suelo parece estar directamente relacionada con otras propiedades, como la densidad y la retención de agua. Este hecho se pone de manifiesto mediante las buenas correlaciones, negativa, ( $R^2 = 0,483$ ;  $P < 0,05$ ) encontradas entre el C total y la densidad del suelo a capacidad de campo (Fig. 14 B y C). Shoji y col., (1996) atribuye la baja densidad de los Andosoles principalmente al desarrollo de microagregados con alta porosidad y una gran acumulación de materia orgánica, cuya formación depende en gran medida de los contenidos en minerales de bajo grado de orden y de la cantidad y tipo de arcilla



Tabla 6.- Características climáticas y algunas de las propiedades físico-químicas de los perfiles estudiados clasificadas por horizontes.

Perfil	Horizontes	Prof. cm	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>o</sub> g kg <sup>-1</sup>	Al <sub>o</sub> +1/2Fe <sub>o</sub>	Ret. Fosfatos	(Al <sub>p</sub> +Fe <sub>p</sub> )/C <sub>p</sub>	C	Precipitación	T <sup>a</sup> Media Anual	T <sup>a</sup> Mes más frío	T <sup>a</sup> Mes más cálido
					%	%	mol:mol	t ha <sup>-1</sup>	mm		° C	
<b>HORIZONTES SUPERFICIALES (n=40)</b>												
Gabro	Val do Dubra	Ah1	0-35	20.0	11.3	2.6	97.58	0.18	209.57	1600-1800	13-14	6.4
		Ah2	50-80	38.6	12.1	4.5	98.26	0.16	121.23			17.6
	F. P. Cabaleira	A	0-35	31.3	9.2	3.6	98.10	0.21	208.25	1600-1800	13-14	6.4
	L. P. Cabaleira	Ah1	0-30	29.3	12.3	3.5	96.51	0.16	259.24	1600-1800	13-14	6.4
Anfibolita		Ah2	30-80	25.1	8.6	2.9	96.21	0.17	447.93			17.6
		Ah3	80-150	25.9	11.5	3.2	97.62	0.03	640.72			
		Ah4	150->200	33.6	12.6	4.0	97.08	0.21	386.25			
	E. Mera I	Ah1	0-20	11.0	9.0	1.5	81.16	0.25	79.69	800-1000	14-15	8-10
E. Mera II		Ah2	20-60	9.9	14.2	1.7	85.54	0.25	176.65			
		Ah3	60-80	9.7	18.7	2.0	86.33	0.31	92.80			
	Xinzo	A	0-40	9.9	8.2	1.4	84.06	0.28	126.51	800-1000	14-15	8-10
		Ah1	0-20	15.2	11.8	2.1	93.91	0.20	134.03	1400-1800	11-12	4-6
Monte Castro I		Ah2	20-60	17.8	12.7	2.4	95.48	0.21	267.88			
		A	0-28	10.6	8.3	1.5	84.12	0.19	172.11	1400-1800	10-11	2-4
	Monte Castro II	A	0-35	13.9	14.1	2.1	94.51	0.18	239.88	1400-1800	10-11	2-4
	Goiás I	AR	0-10	24.5	9.5	2.9	96.27	0.16	79.63	1200-1400	14-15	8-10
Goiás II		Ah	0-40	23.4	12.4	3.0	95.07	0.07	278.16	1200-1400	14-15	8-10
	Coristanco	A	0-40	13.4	12.6	2.0	90.09	0.18	363.24	1200-1400	>15	>20
	Bréixa	Ah1	0-20	11.3	3.3	1.3	91.64	0.17	108.51	1400-1800	14-15	8-10
		Ah2	20-55	15.2	4.7	1.8	90.82	0.44	124.49			
Serpentina	A Golada	Ap1	0-35	5.9	10.0	1.1	57.57	0.34	72.48	1400-1800	13-14	6-8
		Ap2	35-55	6.9	11.3	1.3	67.41	0.36	53.84			
	Melide	A	0-10	6.7	16.1	1.5	75.55	0.37	39.00	1400-1800	11-12	4-6
	Vilouriz	A	0-30	5.0	13.3	1.2	47.01	0.14	142.95	1400-1800	10-11	2-4
Pena Armada		A	0-25	6.2	19.1	1.6	64.57	0.15	134.81	1400-1800	10-11	2-4
	Campo Marzo	A	0-40	4.6	5.0	0.7	41.71	0.37	86.64	1400-1800	14-15	8-10
	Morais I	Ap	0-20	1.2	3.2	0.3	13.35	0.45	9.91	800-1000	>12.5-≤14	n.d.
	Morais II	A	0-20	1.3	3.5	0.3	17.04	0.23	23.52	800-1000	>12.5-≤14	n.d.
Bragança	Limões	A	0-10	1.0	7.4	0.5	24.11	0.14	9.52	800-1000	>12.5-≤14	n.d.
		A	0-10	2.1	6.8	0.5	23.00	0.23	15.25	800-1000	>10-≤12.5	n.d.
		A	0-10	2.0	4.2	0.4	20.66	0.15	10.47	1000-1200	>10-≤12.5	n.d.
	A Soeira	A	0-10	2.0	4.2	0.4	20.66	0.15	10.47	1000-1200	>10-≤12.5	n.d.
Granulita	Mirador Capelada	Ah1	0-30	12.1	18.1	2.1	93.80	0.16	233.60	1000-1200	13-14	6-8
		Ah2	30-70	16.9	9.2	2.1	89.60	0.25	259.17			
	Forte Vello	Ap1	0-30	5.8	18.3	1.5	61.69	0.21	79.33	1400-1800	11-12	4-6
		Ap2	30-100	8.1	18.7	1.7	62.12	0.24	187.59			
Esquistos		Ap3	100-210	9.9	20.3	2.0	72.83	0.37	351.43			
	Adegaína	A	0-20	0.8	1.8	0.2	6.79	0.08	27.16	600	>14	n.d.
	Gouveia	A	0-10	0.7	1.9	0.2	5.91	0.07	13.34	600	>14	n.d.
	Sendim da Serra	A	0-20	1.7	5.1	0.4	12.94	0.11	17.31	800-1000	>10-≤12.5	n.d.
Gneis	P. Masanteo	Ah	0-20	10.4	14.9	1.8	87.99	0.20	153.84	800-1000	14-15	8-10

Tabla 6.-Continuación

	Perfil	Horizontes	Prof. cm	Al <sub>0</sub> g kg <sup>-1</sup>	Fe <sub>0</sub>	Al <sub>0</sub> +1/2Fe <sub>0</sub>	Ret. Fosfatos %	(Al <sub>p</sub> +Fe <sub>p</sub> )/C <sub>p</sub>	C t ha-1	Precipitación mm	T <sup>a</sup> Media Anual	T <sup>a</sup> Mes más frío	T <sup>a</sup> Mes más cálido
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES B (n=17)													
Gabro	Val do Dubra	B	80-100	5.6	8.2	1.0	72.67	0.63	23.63				
	F. P. Cabaleira	BA	35-90	4.1	2.5	0.5	53.59	0.94	25.63				
	Anfibolita	AB	80-105	9.6	21.6	2.0	78.82	0.45	230.95				
		B	>105	8.7	13.8	1.6	80.76	1.06	22.49				
	E. Mera II	B	40-82	8.9	7.7	1.3	67.75	0.54	50.90				
		B2	82-150	3.7	4.5	0.6	31.53	0.85	19.55				
	B3	150-180	3.5	4.2	0.6	41.74	1.55	10.41					
	Xinzo	B	60-80	6.1	4.9	0.9	61.81	0.50	26.28				
	Goiás II	AB	40-60	20.0	14.0	2.7	95.95	0.19	84.37				
	Coristanco	B	40-70	7.2	4.3	0.9	77.69	0.52	34.10				
Serpentina	Breixa	B	55-94	6.9	2.1	0.8	54.84	1.14	21.54				
	Melide	B	10-40	5.1	16.4	1.3	68.44	1.50	33.30				
	Vilouriz	B	30-45	3.6	5.9	0.7	32.70	0.17	33.01				
	Campo Marzo	B	40->100	3.3	3.1	0.5	52.14	1.19	51.60				
Esquisto	Morais II	B	20-40	1.2	2.6	0.2	13.53	0.12	23.37				
	Serdin da Serra	B	20-60	1.3	3.3	0.3	17.40	0.36	17.54				
	P. Masanteo	B	20-50	9.0	16.3	1.7	83.10	0.21	188.49				
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES C (n=13)													
Gabro	Val do Dubra	C	100-200	5.0	4.1	0.7	63.85	2.37	27.49				
	F. P. Cabaleira	2BC	90-130	3.5	3.2	0.5	64.03	0.69	7.86				
Anfibolita	Xinzo	CB	80-120	4.1	5.0	0.7	53.15	0.74	24.40				
	Monte Castro I	2BC	28-128	4.1	2.1	0.5	58.26	0.83	38.12				
		2C	>128	2.7	1.3	0.3	41.54	0.61	n.d.				
	Monte Castro II	BC	35-75	8.2	20.3	1.8	77.75	0.44	n.d.				
		C	60->200	4.7	3.2	0.6	65.15	0.94	71.52				
	Goiás II	CB	70-100	5.0	3.7	0.7	62.00	0.84	24.49				
Serpentina	Breixa	C	>94	2.8	2.3	0.4	52.11	0.83	3.47				
	Melide	C	40-60	3.2	11.3	0.9	55.86	1.74	7.93				
	Vilouriz	CB	>45	1.1	5.2	0.4	25.22	0.21	13.53				
	Pena Armada	Cg	25-47	1.7	5.2	0.4	17.96	0.19	n.d.				
Gneis	P. Masanteo	C	50-110	3.2	3.3	0.5	29.56	0.78	n.d.				

(Torn y col., 1997), lo que condiciona la textura del suelo. Por otra parte, la estructura del suelo influye de forma significativa en el flujo de agua, disponibilidad y reserva (Pachepsky y Rawls, 2003). De acuerdo con esto, se han hallado correlaciones relativamente buenas entre el contenido en C total y la capacidad de retención de agua a 10 kPa ( $R^2 = 0,199$ ;  $P < 0,05$ ) y 1500 kPa ( $R^2 = 0,444$ ;  $P < 0,05$ ) (Fig. 15 A). Suelos con mayores contenidos en C orgánico, Andosoles sobre materiales gabroicos y anfibolitas (Fig 15 A) presentan un mayor contenido en agua a ambos kPa (Tabla 3). Se ha de notar que los suelos sobre gneis presentan una mayor capacidad de retención de agua que los de anfibolitas y granulitas (Fig. 15 A). Esto se debe a que, a pesar de no ser Andosoles, presentan una gran cantidad de minerales de bajo grado de orden como resultado de unas condiciones climáticas que los procesos de meteorización y que contribuyen a la liberación de gran cantidad de Al reactivo, tal y como lo sugiere el test de reactividad de  $pH_{NaF}$  (10,6; Tabla 1) y los valores prácticamente iguales de  $Al_p$  y  $Al_o$  (10,4 y 10,5  $g\ kg^{-1}$ ; Tabla 1).

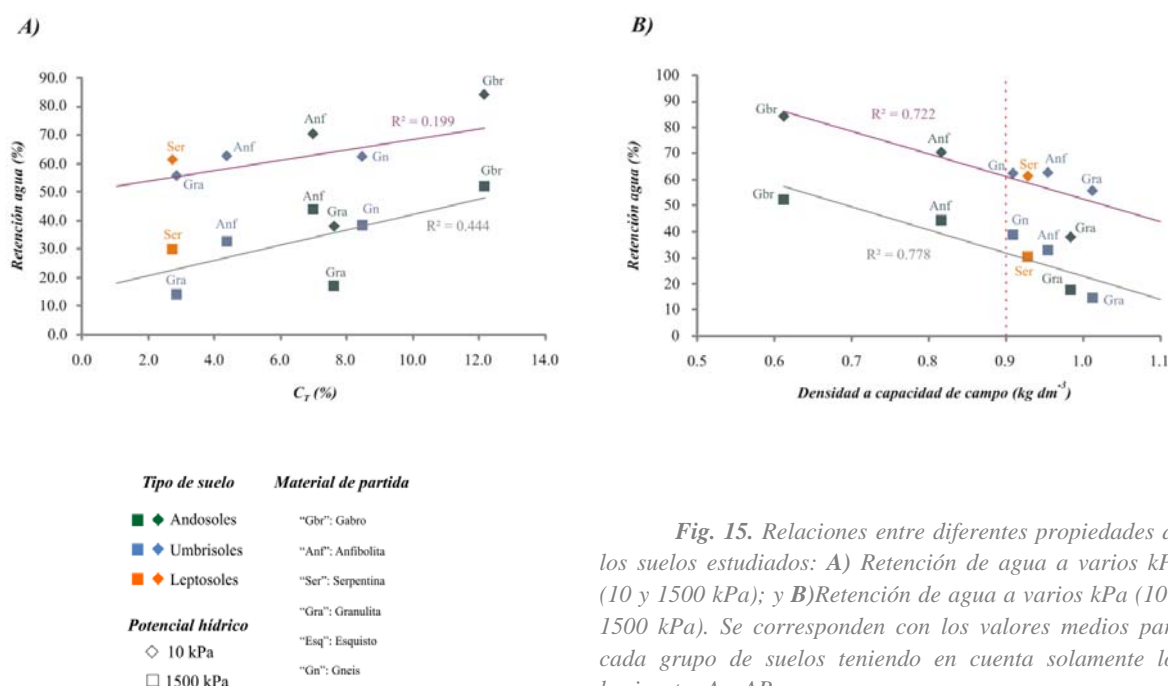


Fig. 15. Relaciones entre diferentes propiedades de los suelos estudiados: A) Retención de agua a varios kPa (10 y 1500 kPa); y B) Retención de agua a varios kPa (10 y 1500 kPa). Se corresponden con los valores medios para cada grupo de suelos teniendo en cuenta solamente los horizontes A y AB.

Si tomamos la densidad del suelo como parámetro de referencia, de forma que se tiene en cuenta tanto el contenido en C orgánico, el contenido y tipo de arcilla, la porosidad, textura, etc., frente a los valores obtenidos para la capacidad de retención de agua a los distintos potenciales hídricos (10 y 1500 kPa) podemos ver que la correlación entre ambas variables (10 kPa:  $R^2 = 0,722$ ;  $P < 0,05$ ; 1500 kPa:  $R^2 = 0,778$ ;  $P < 0,05$ ) mejora significativamente (Fig. 15 B), lo que pone de manifiesto la importancia de la estructura del suelo sobre las propiedades hídricas. Si consideramos que el agua retenida a 10 kPa constituye el agua retenida en macroporos y la retenida a 1500 kPa la incluida dentro de microporos, podemos llegar a la conclusión de que son los

microagregados, ricos en materia orgánica, los responsables de los altos valores de retención de agua en suelos desarrollados sobre materiales gabroicos (84,3 % a 1500 kPa; Fig. 15 B). A medida que aumenta la densidad del suelo el agua retenida desciende a medida que baja el contenido en C orgánico y la textura es más arenosa. Así los suelos ándicos y no ándicos desarrollados sobre granulitas (Fig. 15 B), con texturas franco arenosas (ver epígrafe descripción de perfiles) presentan menor capacidad de retención de agua que suelos sobre materiales serpentínicos (Fig. 15 B), cuyas texturas más arcillosas dificultan la circulación de agua contribuyendo a su retención.

## 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre las propiedades físicas químicas y mineralógicas de los suelos estudiados, determinadas en buena medida por la composición de los diferentes materiales de partida, cuya evolución depende del contenido en minerales fácilmente meteorizables, y por las condiciones climáticas de precipitación y temperatura de las zonas en las que se encuentran, puesto que de ellas dependen los procesos de meteorización (Parfitt, 1990; Arnalds y col., 1995), la producción primaria y la tasa de mineralización (Ladd, y col., 1985; Parton y col., 1987; Sala y col., 1988; Burke y col., 1989; USDA-SCS, 1994; Bird y col., 1996).

La existencia de regímenes ombrotérmicos de carácter templado-húmedo o templado-muy húmedo en las zonas en las que se encuentran los perfiles desarrollados sobre gabros, anfíbolitas, granulitas y gneises conducen a un incremento de la producción primaria, que se ve reflejada por los altos contenidos de C orgánico de estos suelos, significativamente mayores en comparación con los restantes grupos. Por otra parte, las altas precipitaciones en combinación con las suaves temperaturas durante la mayor parte del año y los altos contenidos de materia orgánica de los suelos, sugiere que las tasas de meteorización en estas zonas son más elevadas que en aquellas en las que las escasas precipitaciones dificultan los procesos de hidrólisis del material de partida y ralentizan por ello la cinética de los procesos de meteorización, caso de los suelos sobre esquistos y serpentinas ubicados en zonas cálidas de Portugal. Este incremento en las tasas de meteorización explicaría la presencia de las altas cantidades de todas las formas de Al, estudiadas mediante las distintas técnicas de disolución selectiva, en los perfiles desarrollados sobre anfíbolitas, gabros, granulitas y gneises, significativamente más elevadas que en los restantes grupos de suelos. La presencia de formas reactivas del Al, tal y como lo indican los altos valores de  $pH_{NaF}$ , junto con los altos contenidos en C orgánico y los valores de  $Al_p/Al_o$  próximos a 1 en los suelos mencionados, sugieren que la mayor parte del Al se encuentra formando parte de complejos Al-humus o de minerales de bajo grado de orden (alofano), evidenciados en el análisis mineralógico de la fracción arcilla, que confieren a la materia orgánica del suelo un cierto grado de protección frente a la degradación microbiana. Esta protección se ve reflejada en las cantidades cuantificadas de C *No ox.* y C *dif. ox.*, significativamente más elevadas en este tipo de suelos.

Los suelos desarrollados sobre los materiales serpentínicos de Melide, a pesar de estar sujetos a un régimen ombrotérmico de carácter húmedo, presentan cantidades de formas reactivas de Al y C orgánico significativamente inferiores a los suelos anteriormente mencionados, lo que se debe, por un lado, a la carencia de aluminosilicatos en el material de partida que actúen como fuente de Al durante los procesos de meteorización, y por otro, a las limitaciones de desarrollo de la producción primaria de estos suelos, debidas principalmente a presencia de grandes cantidades de  $Mg^{+2}$  en el complejo de cambio (suelos hipermagnésicos) y, en muchos casos, a la toxicidad originada por la presencia de metales pesados. En los suelos serpentínicos, al igual que los suelos desarrollados sobre esquistos, de Portugal tanto los procesos de meteorización como la producción primaria se ven todavía más limitados por la escasez de precipitaciones. La escasa presencia de complejos Al-humus y de minerales de bajos grado de orden conduce a que la mayor parte del C orgánico de estos suelos se encuentre en formas más fácilmente oxidables, aunque existe un cierto grado de protección generalmente a través de la interacción de los componentes orgánicos con la fracción limo del suelo.

Como consecuencia de todo ello, los suelos desarrollados sobre gabros junto con la mayoría de los desarrollados sobre anfíbolitas y granulitas, son susceptibles de ser clasificados como Andosoles según la WRB (FAO, 2006) y la ST (SSS, 2006) al cumplir todos los criterios de propiedades ándicas establecidos en dichos sistemas de clasificación. Los restantes suelos desarrollados sobre estos materiales se clasifican como Umbrisoles (FAO, 2006) e Inceptisoles (SSS, 2006), aunque muchos de ellos cumplen algunas de las propiedades ándicas, salvo el perfil de Goias I que, aunque cumplen todos los criterios para propiedades ándicas ( $Al_0+1/2Fe_0$  de 2,9 %), con un espesor de 10 cm solamente puede ser clasificado como Leptosol. Estos resultados nos llevan a sugerir que en la clasificación de la WRB (2006) se debería incluir, además de la posibilidad de clasificar como Andosoles a los suelos con  $> 2\%$ , con independencia de su espesor, creando una subunidad lítica, a los suelos con  $>1\%$  en subunidades ándicas, de forma similar al criterio de la Soil Taxonomy (1999). Por último, los suelos serpentínicos y esquistosos, dado su escaso desarrollo y espesor, se encuentran incluidos dentro de los Ordenes Leptosol y Cambisol, con la excepción de los perfiles de Melide y Vilouriz que se incluyen dentro del Orden Umbrisol.

Si consideramos que el criterio que mejor representa el estado de las propiedades ándicas es el índice  $Al_0+1/2Fe_0$  se observa que las situaciones que permiten la formación de suelos que superan el valor de definición de los Andosoles ( $> 2\%$ ) sólo se presentan cuando existe una combinación de suelos desarrollados sobre una roca básica (anfíbolitas, gabros, granulitas o gneises básicos), sólo en horizontes A (con mayor posibilidad en los horizontes Ah2 frente a los Ah1) o AB y el régimen hídrico es de carácter údico. El carácter xérico elimina por completo cualquier posibilidad de alcanzar valores de  $Al_0+1/2Fe_0$  próximos a 1,0, como lo demuestra el hecho de que partiendo de rocas de composición básica o ultrabásica en los suelos de Portugal este índice nunca supera 0,5 %. En condiciones údicas, la presencia de rocas serpentinizadas como material de partida, si bien, algunos horizontes desarrollados sobre estos materiales pueden llegar a presentar valores superiores a 1,0 %, por tratarse de rocas escasamente serpentinizadas o con una serpentización puntual asociada a los planos de fisuración, la alta hidromorfia, la evolución edáfica avanzada y el cultivo reducen o eliminan la importancia del carácter ándico.



## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Profesor Armindo Aires Afonso Martins, del Departamento de Edafología de la Universidad de Tras-os-Montes e Alto Douro, por la innumerable información aportada correspondiente a los perfiles de Portugal, y a Veli y Adriana, del Departamento de Edafología y Química Agrícola de la Facultad de Biología (Universidad de Santiago de Compostela) la inestimable ayuda prestada durante la fase analítica del estudio.



## 6. Bibliografía

- AGROCONSULTORES e COBA, 1991. Carta de Solos, Carta de Uso Actual da Terra e Carta de Aptidão da Terra e do NE de Portugal. Memórias e Anexos. UTAD, Vila Real, Portugal.
- Alexander, E.B., Shoji, S., West, R. 1993. Andic soil properties of Spodosols in nonvolcanic materials of Southeast Alaska. *Soil Science Society of America Journal*. 57: 472-475.
- Amato, M.A., Ladd, J.N. 1992. Decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labelled glucose and legume material in soils: properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*. 24: 455-464.
- Aran, D., Zida, M., Jeanroy, E., Herbillon, A.J. 1998. Influence of parent material and climate on andic properties of soils in a temperate montane region (Vosges, France). *European Journal of Soil Science*. 46: 269-281.
- Aran, D., Gury, M., Jeanroy, E. 2001. Organo-metallic complexes in an Andosol: a comparative study with a Cambisol and Podzol. *Geoderma*, **99**, 65-79.
- Arnalds, O., Hallmark, C.T., Wilding, L.P. 1995. Andisols from four different regions of Iceland. *Soil Science Society of America Journal*. 59: 121-169.
- Bailey, S.W. 1988. Chlorites: Structures and crystal chemistry. In: Bailey, S.W. (Eds.). Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas). Reviews in Mineralogy. Vol. 19. *Mineralogical Society of America*. Washington D.C. 347-403 pp.
- Bain, D.C., Duthie, D.M.L. 1984. The effect of weathering in the silt fractions on the apparent stability of chlorite in Scottish soil clays. *Geoderma*. 34: 221-227.
- Bartolomé, C., Álvarez, J., Vaquero, J., Costa, M., Casermeiro, M.A., Giraldo, J., Zamora, J. 2005. Los tipos de Hábitat de Interés Comunitario de España. Guía Básica. Dirección General para la Diversidad. Ministerio de Medio Ambiente. 287 pp.
- Bascomb, C.L. 1968. Distribution of pyrophosphate extractable iron and Organic carbon in soils of various groups. *Journal of Soil Science*. 19: 251-256.
- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47: 151-63.
- Bäumler, R., Zech, W. 1994. Characterization of Andisols developed from nonvolcanic material in Eastern Nepal. *Soil Science*. 158: 211-217.
-

- Bigham, J.M., Fitzpatrick, R.W., Schulze, D.G. 2002. Ion oxides. In: Dixon, J.B. and Schulze, D.G. (Eds.). *Soil Mineralogy with Environmental Applications. Soil Science Society of America Journal Book Series. 7.* Madison. Wisconsin. USA. 323-366 pp.
- Bird, M.I., Chivas, A.R., Head, J. 1996. A latitudinal gradient in carbon turnover times in forest soils. *Nature*. 381: 143-146.
- Blakemore, L.C., Searle, P.L., Daly, B.K. 1981. Soil bureau laboratory methods: A methods for chemical analysis of soils. *New Zealand Soil Bureau Scientific Report*. 10a (revised): 44-45.
- Borggaard, O.K. 1985. Organic matter and silicon in relation to the crystallinity of soil iron oxides. *Acta Agricultural Scandinavica*. 35: 398-406.
- Boudot, J.P., Bel Hadj, B.A., Steiman, R., & Seigle-Murandi, F. 1989. Biodegradation of synthetic organo-metallic complexes of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios. *Soil Biology and Biochemistry*. 21: 961-966.
- Buhmann, C., Shoeman, J.L. 1995. A mineralogical characterization of Vertisols from the northern regions of Republic of South Africa. *Geoderma*. 66: 239-257.
- Bulmer, C.E., Lavkulich, L.M., Schreier, H.E. 1992. Morphology, chemistry, and mineralogy of soils derived from serpentinite and tephra in southwestern British Columbia. *Soil Science*. 154: 72-82.
- Buurman, P., Peterse, F. & Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils – A pyrolysis-GC/MS study of Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science*. 58: 1330-1347.
- Burke, I.C., Yonker, C.M., Parton, W.J., Cole, C.V., Flach, K., Schimel, D.S. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter in U.S. grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*. 53: 800-805.
- Buytaert, W., Sevink, J., de Leeuw, B., Deckers, J. 2005. Clay mineralogy of soils in the Ecuadorian Páramo region. *Geoderma*. 127: 114-129.
- Caner, I., Bourgeon, G., Toutain, F., Herbillon, A.J. 2000. Characteristics of non-volcanic Andisols derived from low-activity clay regoliths in the Nilgiri Hills (Southern India). *European Journal of Soil Science*. 51: 553-563.
- Carnicelli, S., Mirabella, A., Cecchini, G. 1997. Weathering of chlorite to a low-charge expandable mineral in a Spodosol on the Apennine mountains, Italy. *Clays and Clay Mineralogy*. 45: 28-41.
- Camps Arbestain, M., Barreal, M.E., Macías, H. 2001. Sulfate sorption in nonvolcanic Andisols and Andic Soils from Galicia (NW Spain). *Geoderma*. 104: 75-93.

- Churchman, G.J. 1980. Clay minerals formed from micas and chlorites in some New Zealand soils. *Clays and Clay Mineralogy*. 15: 59-76.
- Coffman, C.B., Fanning, D.S. 1975. Maryland soils development in residuum from chloritic metabasalt having high amounts of vermiculite in sand and silt fractions. *Soil Science Society of America Proceedings*. 30: 723-732.
- Davidson, E.A., Ackerman, I.L., 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untillied soils. *Biogeochemistry*. 20: 161-193.
- De La Calle, C., Suquet, H. 1988. Vermiculite. In: Bailey, S.W. )Eds.). Hydrous phyllosilicates (exclusive of mica). Reviews in mineralogy. Vol. 19. *Mineralogical Society of America*. Washington D.C. 455-496 pp.
- Diario Oficial da Unión Europea, L 387, de 29 de diciembre de 2004.
- Douglas, L.A. 1989. Vermiculites. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.). Minerals and soil environments. 2<sup>nd</sup>. Ed. Soil Science Society of America Book Series. 1. *Soil Science Society of America*. Madison. WI. 635-674 pp.
- Duiker, S.W., Lal, R. 1999. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio. *Soil and Tillage Research*. 52: 73-81.
- Eswaran, H. Stoops, G., Sys, C. 1977. The micromorphology of gibbsite forms in soils. *European Journal of Soil Science*. 28: 136-143.
- FAO/UNESCO, 1987. Soil map of the World. Revised Legend. World Soil Resources Report 60. Rome.
- FAO-UNESCO. 2006. World Reference Base for Soil Resources. First update 2007. A framework for International Classification, Correlation and Communication. World Soil Resource. Rep. 103. FAO. Rome.
- Feller, C., Fritsch, E., Poss, R., Valentin, C. 1991. Effect of texture on the storage and dynamics of organic matter in some low activity clay soils (West Africa, particularly). *Cah. ORSTOM. Ser. Pedol.* XXVI: 25-36.
- Fieldes, M., Perrot, K.W. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. *New Zealand Journal of Soil Science*. 9: 623-629.
- García-Rodeja, E., Silva, B.M., Macías, F. 1987. Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *European Journal of Soil Science*. 38 (4): 573-591.
-



- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O. Clarke, P. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Australian Journal for Soil Resources*. 32: 1043-1068.
- Golchin, A., Baldock, J.A., Clarke, P., Higashi, T., Oades, J.M. 1997. The effects of vegetation and burning on the chemical composition of soil organic matter in a volcanic ash soil. II Density fractions. *Geoderma*. 76 175-192.
- González-Pérez, J.A., Arbelo, C.D., González-Vila, F.J., Rodríguez Rodríguez, A., Almendros, G., Armas, C.M., Polvillo, O. 2007. Molecular features of organic matter in diagnostic horizons from Andosols as seen by analytical pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 80: 369-382.
- Gutián, F. y Carballas, T. 1976. Técnicas de análisis de suelos. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. Spain.
- Harris, W.G., Zelazny, L.W., Baker, J.C., Martens, D.C. 1985a. Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils. I. Extent, profile trends, and grain morphological effects. *Soil Science Society of America Journal*. 49: 1290-1297.
- Harris, W.G., Zelazny, L.W., Bloss, F.D. 1985a. Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils. II. Zonation in single grains. *Soil Science Society of America Journal*. 49: 1297-1302.
- Hewitt, A.E., Witty, J.E. 1988. Andisol transition with other soils. In: Kinloch, D.I., Shoji, S., Beinroth, H.H., Eswaran, H. (Eds.), Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop. Japanese Committee for the Ninth International Soil Classification Workshop for Soil Management Support Services. Washington D.C. 233-383 pp.
- Higashi, T. 1983. Characterization of Al/Fe-humus complex in Dystrandepts through comparison with synthetic forms. *Geoderma*. 31: 277-288.
- Holmgren, G.G. 1967. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Science Society of American Proceedings*. 31: 210-211.
- Huang, P.M., Wang, M.K., Kämpf, N., Schulze, D.G. 2002. Aluminum Hydroxides. In: Dixon, J.B. and Schulze, D.G. (Eds.). Soil Mineralogy with Environmental Applications. *Soil Science Society of America Journal Book Series*. 7. Madison. Wisconsin. USA. 261-289 pp.
- Hunter, C.R., Frazier, B.E., Busaca, A.J. 1987. Lytell Series: a non-volcanic Andisol. *Soil Science Society of American Journal*. 51: 376-383.
- Instituto Geológico e Mineiro. 2000. Carta Geológica de Portugal. Notícia explicativa da Folha 3-D. ESPINHOSELA. E. 1:50.000. Secretaria de Estado de Indústria e Energia. Departamento de Geologia. Estrada da Portela – Zambujal. 2720 Alfragide. Lisboa

- Instituto Geológico e Mineiro. 2000. Carta Geológica de Portugal. Notícia explicativa da Folha 7-B. BRAGANÇA. E. 1:50.000. Secretaria de Estado de Indústria e Energia. Departamento de Geologia. Estrada da Portela – Zambujal. 2720 Alfragide. Lisboa.
- Instituto Geológico e Mineiro. 2000. Carta Geológica de Portugal. Notícia explicativa da Folha 7-D: MACEDO DE CAVALEIROS. E. 1:50.000. Secretaria de Estado de Indústria e Energia. Departamento de Geologia. Estrada da Portela – Zambujal. 2720 Alfragide. Lisboa.
- Instituto Geológico e Mineiro. 2000. Carta Geológica de Portugal. Notícia explicativa da Folha 11-B. MOGADOURO. E. 1:50.000. Secretaria de Estado de Indústria e Energia. Departamento de Geologia. Estrada da Portela – Zambujal. 2720 Alfragide. Lisboa.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. CARIÑO. Hoja 1. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. CEDEIRA. Hoja 7. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. SISARGAS-CARBALLO. Hoja 44. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. SANTA COMBA. Hoja 69. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. ARZUA. Hoja 96. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. LA ESTRADA. Hoja 121. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Instituto Geológico y Minero de España. 1978. Mapa Geológico de España. GOLADA. Hoja 122. E. 1:50.000. Ríos Rosas 23. Madrid 3.
- Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philos. Trans.: Biological Science*. 329: 361-367.
- Kaiser, K., Zech, W. 1996. Defects in estimation aluminum in humus complex of podzolic soils by pyrophosphate extraction. *Soil Science*. 161: 452-458.
- Kimble, J.M., Ping, C.L., Sumner, M.L., Wilding, L.P. 2000. In: M.E. Sumner (Ed.). *Handbook of Soil Science*, CRC Press. Boca Ratón, Florida. USA. E209-E224 pp.
-

- Krull, E.S., Baldock, J.A., Skjemstad, J.O. 2003. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modeling carbon turnover. *Functional Plant Biology*. 30: 207-222.
- Justo, A., Maqueda, C., Pérez-Rodríguez, J.L., Lagaly, G. 1987. An usually expandable low-charge vermiculite. *Clay Mineralogy*. 22: 319-327.
- Ladd, J.N., Amato, M., Oades, J.M. 1985. Decomposition of plant materials in Australian soils. II. Residual organic and microbial biomass C and N from isotope-labelled legume materials and soil organic matter, decomposing under field conditions. *Australian Journal for Soil Resources*. 23: 603-611.
- Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.P. 1998. In: R. Lal, J.M. Kimble, R.P. Follet (Eds.). Soils Processes and the Carbon Cycle. CRC Press. Florida. USA. 595-604 pp.
- Leamy, M.L., Smith G.D., Colmet-Daage, F., Ottawa, M. 1980. The morphological characteristics of andisols. In: Theng B. K. G. (Ed.), Soils with Variable Charge. New Zealand Society of Soil Science & New Zealand Department of Scientific & Industrial Research, Soil Bureau, Lower Hutt, pp.17-34.
- Leamy, M.L. 1984. Andisols of the world. Congreso Internacional de Suelos Volcánicos. Comunicaciones. *Universidad de La Laguna Secretariado de Publicaciones*. 13: 368-387.
- Lilienfein, J., Qualls, R.G., Uselman, S.M, Bridgham, S.D. 2004. Adsorption of dissolved organic carbon and nitrogen in soils of a weathering chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 292-305.
- Luciuk, G.M., Huang, P.M. 1974. Effect of monosilicic acid on hydrolytic reactions of aluminum. *Soil Science Society of America Proceedings*. 38: 235-244.
- Macías, F. 1981. Formation of Gibbsite in soils and saprolites of temperate-humid zones. *Clay Mineralogy*. 16: 43-52.
- Macías, F., Calvo de Anta, R. 1992. Pedogeochemical characterization of the soils of Galicia (NW Spain) with respect to lithological variations. Evidence of a transitional environment between temperate and subtropical humid domains. *Comptes-Rendus de l'Académie de Science*. París. Série II. 315: 1803-1810.
- Masiello, C.A., Chadwick, O.A., Southon, J., Torn, M.S., Harden, J.W. 2004. Weathering controls on mechanisms of carbon storage in grassland soils. *Global Biogeochemistry Cycles*. 18: GB4023, doi: 10.1029/2004GB002219.
- Martin, J.P., Haider, K. 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. In: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (eds P.M. Huang & M. Schnitzer), pp. 283-304. Soil Science Society of America, Special Publication 17. ASA, Madison, WI.

- Martínez Cortizas, A., Castillo, F., Pérez Alberti, A., Valcárcel, M., Blanco Chao, R. 1999. Atlas Climático de Galicia. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. A Coruña. 207 pp.
- Merino, A., Álvarez, E., García-Rodeja, E. 1993. Response of some soils of Galicia (NW Spain) to H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Water Air and Soil Pollution*. 74: 89-101.
- Mizota, C., Wada, K. 1980. Implications of clay mineralogy to the weathering and chemistry of Ap horizons of Ando Soils in Japan. *Geoderma*. 23: 49-63.
- Mizota, C., van Reeuwijk, L.P. 1989. Clay Mineralogy and Chemistry of Soils Formed in Volcanic Material in Diverse Climatic Regions. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Moustakas, N.K., Georgoulis, F. 2005. Soils developed on volcanic materials in the island of Thera, Greece. *Geoderma*. 129: 125-138.
- Munsell Soil Colour Charts, 2000 Revised Washable Edition. Gretagmacbeth, New Windsor, NY.
- Murray, H.H., Keller, W.D. 1993. Kaolins, kaolins, and kaolins. In: Murray, H.H. *et al.*, (Eds.). Kaolin genesis and utilization. Special Publication. 1. *Clay Minerals Society*. Boulder, CO. 1-24 pp.
- Nanzyo, M., Dahlgren, R.A., Shoji, S. 1993. In: S. Shoji, Nanzyo, M., Dahlgren, R.A. (Eds.). Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 145-187 pp.
- Nahon, D.B. 1991. Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering. Wiley. New York. 313 pp.
- Oades, J.M. 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. In: Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.). Minerals and soil environments. 2<sup>nd</sup> Ed. *Soil Science Society of America*. Madison, WI. 89-159 pp.
- Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*. 54: 443-451.
- Page, C.R., de Kimpe, C.R. 1989. Dissolution des composés ferrugineux et alumineux des horizons B podzoliques de sols du Québec par le dithionite-citrate, l'oxalate, le pyrophosphate et le tetraborate. *Canadian Journal of Soil Science*. 69 : 451-459.
- Parfitt, R.L., Henni, T. 1982. Comparison of an oxalate-extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Science and Plant Nutrition*. 28: 183-190.
- Parfitt, R.L. 1990. Soils formed in tephra in different climatic regimes. Trans. 14<sup>th</sup>. *International Congress of Soil Science*. VII: 134-139.
-

- Parfitt, R.L., Parshotam, A., Salt, G.J. 2002. Carbon turnover in two soils with contrasting mineralogy under long-term maize and pasture. *Australian Journal of Soil Resource*. 40: 127-136.
- Paterson, E., Clark, L., Birnie, C. 1993. Sequential selective dissolution of iron, aluminium, and silicon from soils. *Communications in Soils Science and Plant Analysis*. 24: 2015-2023.
- Parton, W.J., Schimel, D.C., Cole, C.V., Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grassland. *Soil Science Society of America Journal*. 51: 1173-1179.
- Percival, H.J., Parfitt, R.L., Scott, N.A. 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: Is clay content important?. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 1623-1630.
- Post, W.M., Emmanuel, P.J., Zinke, P.J., Stangenberger, A.G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*. 298: 310-326.
- Post, W.M., Mann, L.K. 1990. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation. In: Bouwman, A.F. (Ed.). *Soils and the Greenhouse Effect*. J. Wiley and Sons. New York. 401–406 pp.
- Poulenard, J., Herbillon, A.J. 2000. Sur l'existence de trois catégories d'horizons de référence dans les Andosols. *C.R. Académie Science Paris. Terre et plan*. 331: 651-657.
- Righi, D., Petit, S., Bouchet, A. 1993. Characterization of hydroxy-interlayered vermiculite and illite/smectite interstratified minerals from the weathering of chlorite in a Cryorthod. *Clays and Clay Mineralogy*. 41: 484-495.
- Rhoades, J. 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L. (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Parte 2. Agronomy Monograph N° 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*. Madison. W.I. 178-190 pp.
- Ross, G.C., Kodama, H. 1974. Experimental transformation of a chlorite into a vermiculite. *Clays and Clay Mineralogy*. 22: 205-211.
- Saggar, S., Parshotam, A., Sparling, G.P., Feltham, C.W., Hart, P.B.S. 1996. C-14-labelled ryegrass turnover and residence times in soils varying in clay content and mineralogy. *Soil Biology and Biochemistry*. 28: 1677-1686.
- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A., Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*. 69: 40-45.
- Schimel, D.S., Coleman, D.C., Horton, K.A. 1985a. Soil organic matter dynamics in paired rangeland and cropland toposequences in North Dakota. *Geoderma*. 36: 201-214.

- Schimel, D.S., Stillwell, M.A., Woodmansee, R.G. 1985b. Biogeochemistry of C, N, and P in a soil catena of the short grass steppe. *Ecology*. 66: 276-282.
- Schlesinger, W.H., 1985. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: Trabalka, J.R., Reichle, D.E. (Eds.). *The Changing Carbon Cycle: A Global Analyses*. Springer-Verlag. New York. 194-220 pp.
- Senkayi, A.L., Dixon, J.B., Hossner, L.R. 1981. Transformations of chlorite to smectite through regularly interstratified intermediates. *Soil Science Society of America Journal*. 45: 650-656.
- Serviços Geológicos de Portugal. 1989. Carta Geológica de Portugal. Notícia explicativa da Folha 11-C. TORRE DE MONCORVO. E. 1:50.000. Secretaria de Estado de Indústria e Energia. Direcção-Geral de Geologia e Minas. Rua da Academia das Ciências, 19, 2º. 1200. Lisboa.
- Shang, C., Tiessen, H. 1998. Organic matter stabilization in two semiarid tropical soils: Size, density, and magnetic separations. *Soil Science Society of America Journal*. 62: 1247-1257.
- Shindo, H., Matsui, Y., Higashi, T. 1986a. A possible source of humic acids in volcanic ash soils in Japan-charred residue of *Miscanthus sinensis*. *Soil Science*. 141: 84-87.
- Shindo, H., Higashi, T., Matsui, Y. 1986b. Comparison of humic acids from charred residues of Susuki (*Eulalia, Miscanthus sinensis* A. ) and from the A horizons of volcanic ash soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 32: 579-586.
- Shoji, S., Fujiwara, Y. 1984. Active aluminum and iron in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Science*. 137: 216-226.
- Shoji, S. 1986. Mineralogical characteristics: I. Primary minerals. In Wada, K. (Ed.), *Ando Soils in Japan*. Kyushu University Press. Fukuoka. Japan. 21-40 pp.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R.A. 1993. *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization. Developments in Soils Science* vol. 21, Elsevier, Amsterdam.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R.A., Quantin, P. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Science*. 161: 604-615.
- Singer, A., Stoffers, P. 1987. Mineralogy of hydrothermal sequence in a core from the Atlantis II Deep, Red Sea. *Clay Mineralogy*. 22: 251-267.
- Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S., McGill, W.B., Arah, J.R.M., Chertov, O.G., Coleman, K., Franko, U., Frolking, S., Jenkinson, D.S., Jensen, L.S., Kelly, R.H., Klein-Gunnewiek, H., Komarov, A.S., Li, C., Molina, J.A.E., Mueller, T., Parton, W.J., Thornley, J.H.M., Whitmore, A.P. 1997. A comparison of the



- performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*. 81:153-225.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 2006. Keys of Soil Taxonomy 10<sup>th</sup> ed. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Washington DC.
- Soon, Y.K. 1993. Fractionation of extractable aluminium in acid soils: a review and a proposed procedure. *Communications in Soils Science and Plant Analysis*. 24: 1683-1708.
- Spain, A. 1990. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some Australian rainforest soils. *Australian Journal of Soil Resources*. 28: 825-839.
- Tisdall, J.M. Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*. 33: 141-163.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Hendricks, D.M. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, 389: 170-173.
- Urrutia, M., Macías, F., García-Rodeja, E. (1995). Evaluación del CuCl<sub>2</sub> y del LaCl<sub>3</sub> como extractantes de aluminio en suelos ácidos de Galicia. *Nova Acta Científica Compostelana*. 5: 173-182.
- USDA-SCS. 1994. Soils of the United States 391. CD-ROM. USDA National Soil Survey Laboratory. Lincoln, NE.
- Veldkamp, E. 1994. Organic-carbon turnover in 3 tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 175-180.
- Wada, K., Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic material during the Quaternary. *Soil Science*. 116: 170-177.
- Wada, K. Y Higashi, T. 1976. The categories of aluminium- and iron-complex in Ando soils determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*. 27: 357-368.
- Wada, k. 1980. Mineralogical characteristics of Andisols. In: Theng, B.K.G. (ed.) Soils with variable charge. *New Zealand Society of Soil Science*. p. 87-107.
- Warnaars, F.W. 1967. Petrography of peridotite, amphibolite and gabbro in polyorogenic terrain NW of Santiago de Compostela (Spain). Tesis Doctoral. Universidad de Leiden. 208 pp.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A., Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79: 117-161.

- Zeese, R., Schwertmann, U., Tietz, G.F., Jux, U. 1994. Mineralogy and stratigraphy of three deep lateritic profiles of the Jos plateau Central Nigeria. *Catena*. 21: 195-214.
- Zunino, H., Borie, F., Aguilera, S., Martin, J.P., Haider, H. 1982. Decomposition of C-14-labelled glucose, plant and microbial products and phenols in volcanic ash-derived soils of Chile. *Soil Biology and Biochemistry*. 14: 37-43.



## A<sub>n</sub>exo 1

---

### *Principales Propiedades Físico-Químicas de los suelos estudiados*



Tabla 7.- Principales propiedades físico-químicas de los suelos estudiados.

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H <sup>a</sup>	pH <sub>ISO</sub>	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>Na</sub>			CIC	V	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	N <sub>t</sub>	C/N	HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)										Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>e</sub>	Fe <sub>d</sub>	Si <sub>e</sub>	Si <sub>h</sub>	Si <sub>h</sub>	P <sub>óseo</sub>	S <sub>t</sub>	%
					2'	30'	2h							cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	%	%	g.kg <sup>-1</sup>	%	mol.mol	Al <sub>e</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>c</sub>	Al <sub>d</sub>									
GABRO	Val do Dubra	Ah1	5,2	4,7	11,5	11,6	12,1	12,0	2,5	8,8	30,6	0,72	14,3	0,4	11,1	20,0	20,2	35,5	2,8	11,3	61,3	1,1	7,8	10,1	1,3		0,09					
	F, P, Cabaleira	Ah2	5,2	4,9	11,6	12,0	12,1	14,4	3,1	7,1	24,2	0,63	13,2	0,1	7,7	38,6	39,0	44,5	2,0	12,1	47,5	1,0	13,4	14,7	0,7							
		A	5,0	4,5	11,9	12,0	12,1	12,5	3,2	10,9	51,9	0,78	16,4	0,9	21,1	31,3	37,1	41,9	6,8	9,2	55,3	1,3	4,6	6,5	0,6		0,11					
	L, P, Cabaleira	Ah1	4,8	4,1	11,3	11,3	11,5	21,2	6,7	18,3	77,2	1,50	14,2	1,9	23,0	29,3	33,9	26,6	8,1	12,3	46,6	1,5	2,6	5,2	3,2		0,13					
		Ah2	4,4	4,0	11,3	11,4	11,4	22,8	3,5	16,4	68,9	1,30	14,7	2,4	22,1	25,1	28,3	25,4	7,9	8,6	67,3	1,5	2,1	5,5	3,1							
	Ah3	4,6	4,3	11,8	11,8	11,9	19,1	1,4	14,3	61,3	1,17	14,2	1,3	19,2	25,9	27,1	24,7	2,5	11,5	66,3	1,3	2,3	4,6	1,3								
	Ah4	4,8	4,4	11,7	11,8	11,9	13,4	1,7	9,3	41,5	0,84	12,9	0,7	16,3	33,6	33,9	32,9	6,2	12,6	34,8	1,4	4,5	5,8	6,2								
	ANFIBOLITA	E, Mera I	Ah1	4,7	4,1	10,7	11,1	11,1	9,5	2,0	4,3	15,6	0,42	12,2	1,3	6,2	11,0	11,7	15,3	5,2	9,0	39,0	1,3	2,0	4,6	3,5		0,05				
		Ah2	4,8	4,1	10,9	10,9	10,8	8,8	3,1	5,2	16,8	0,48	12,5	1,6	6,4	9,9	11,6	14,5	6,4	14,2	57,5	1,4	2,0	4,2	4,4							
		Ah3	4,7	3,9	10,2	10,3	10,5	9,7	2,4	5,7	22,9	0,46	14,7	2,4	9,4	9,7	12,1	13,8	13,1	18,7	56,0	1,7	0,9	3,0	6,7							
E, Mera II		A	4,3	4,2	10,5	10,8	11,2	7,1	5,0	4,4	19,1	0,37	13,9	1,2	8,6	9,9	12,1	14,5	7,1	8,2	12,3	1,6	1,4	3,1	4,1		0,05					
		Xinzo	Ah1	5,0	4,1	11,3	11,3	11,6	11,8	3,9	9,1	41,2	0,70	15,2	1,9	14,8	15,2	18,0	19,6	7,3	11,8	33,3	1,5	1,9	4,1	4,8		0,06				
Monte Castro I		Ah2	4,8	4,1	11,6	11,5	11,7	14,9	1,4	9,2	45,3	0,76	14,0	1,9	16,5	17,8	25,9	29,6	9,8	12,7	58,0	1,6	2,0	4,6	4,1							
		A	5,0	4,2	11,2	11,2	11,3	10,7	7,2	6,6	32,9	0,48	16,1	1,4	10,5	10,6	12,8	13,6	7,3	8,3	45,8	1,6	1,6	2,8	3,6		0,06					
Monte Castro II		A	5,2	4,2	11,5	11,6	11,7	16,7	6,8	9,3	42,0	0,66	16,3	2,0	11,7	13,9	16,1	16,9	11,8	14,1	37,3	1,5	1,3	1,8	4,7		0,07					
	Goias I	AR	5,4	4,9	11,6	11,8	11,9	12,6	16,5	9,0	41,0	0,77	13,6	0,4	11,8	24,5	34,6	26,6	5,5	9,5	77,2	1,2	5,6	8,3	3,3		0,07					
Goias II	Ah	5,2	4,7	11,1	11,6	11,7	15,0	19,6	8,6	36,6	0,70	14,3	0,5	11,3	23,4	23,6	25,2	5,8	12,4	56,3	1,4	5,7	9,5	7,8		0,08						
	A	4,8	4,1	11,0	11,5	11,4	12,0	9,8	9,0	35,1	0,70	15,0	1,5	11,1	13,4	25,6	16,4	5,9	12,6	30,6	1,3	2,4	5,0	2,7		0,07						
Coristanco	Ah1	4,9	4,2	11,0	11,3	11,5	9,8	6,9	7,1	33,6	0,48	17,2	1,3	11,3	11,3	19,6	19,8	3,9	3,3	26,8	1,5	2,1	7,1	3,1		0,05						
	Ah2	5,1	4,4	11,1	11,5	11,8	6,9	2,4	5,2	14,0	0,23	17,4	0,5	10,9	15,2	15,7	19,9	5,8	4,7	16,1	1,5	4,3	8,0	1,4								
A Golada	Ap1	4,9	3,9	9,2	9,3	9,4	6,2	14,0	2,5	10,4	0,19	13,0	1,6	5,3	5,9	7,9	8,6	5,2	10,0	50,8	1,5	0,7	5,2	4,6		0,02						
	Ap2	4,9	3,9	9,5	9,5	9,7	6,0	12,1	2,5	12,2	0,21	14,0	1,8	6,7	6,9	8,1	10,7	6,5	11,3	46,3	1,5	0,7	6,1	4,9		0,03						
SERPENTINA	Melide	A	5,6	4,4	9,8	11,0	10,3	7,4	24,4	4,1	13,4	0,31	15,3	0,7	6,1	6,7	13,9	10,7	10,5	16,1	62,5	1,7	1,1	5,0	4,1		0,03					
	Vilouriz	A	6,1	5,4	9,1	9,3	9,5	8,8	70,3	5,3	13,1	0,43	14,5	0,0	2,4	5,0	8,1	4,9	3,7	13,3	73,8	1,0	1,0	2,6	3,7		0,05					
	Pena Armada	A	5,5	4,7	9,3	9,4	9,5	7,7	63,8	7,0	17,0	0,56	14,5	0,2	3,4	6,2	6,9	6,2	4,7	19,1	43,4	1,0	1,2	5,3	5,3		0,07					
	Campo Marzo	A	5,8	4,8	9,5	9,4	9,5	4,6	51,7	2,3	9,1	0,15	17,8	0,1	3,6	4,6	11,5	5,9	8,0	5,0	103,1	1,6	1,1	3,3	1,2		0,02					
	Morais I	Ap	6,4	5,3	8,5	8,5	8,7	6,2	69,3	0,4	1,8	0,03	18,3	0,0	1,1	1,2	1,6	1,6	1,6	3,2	31,3	1,5	0,6	1,8	2,9							
	Morais II	A	6,7	5,9	8,5	8,6	8,7	7,9	77,2	1,3	3,0	0,06	22,8	0,0	0,7	1,3	1,3	1,0	1,7	3,5	47,8	1,4	0,4	1,7	6,9							
	Limões	A	7,3	6,4	8,7	8,8	8,7	6,4	62,8	1,0	2,1	0,10	12,4	0,0	0,2	1,0	2,3	0,4	1,0	7,4	56,8	1,4	1,1	2,3	1,4							
	Bragança	A	5,6	4,5	8,7	8,8	8,8	7,2	71,9	2,7	6,0	0,10	24,3	0,1	1,5	2,1	3,0	3,1	3,3	6,8	32,8	1,4	0,4	2,2	2,7							
A Soeira	A	6,0	4,9	8,7	8,8	8,8	4,4	87,7	1,1	3,4	0,04	30,7	0,0	0,7	2,0	4,6	4,0	1,0	4,2	44,8	0,9	0,5	2,6	1,8								



Tabla 7.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H <sub>s</sub> <sup>a</sup>	pH <sub>med</sub>	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>ms</sub>			CIC	V	C <sub>r</sub>	C <sub>p</sub>	N <sub>r</sub>	C/N	Al <sub>s</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>t</sub>	Al <sub>d</sub>	Al <sub>e</sub>	Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>s</sub>	Fe <sub>d</sub>	Si <sub>p</sub>	Si <sub>s</sub>	Si <sub>h</sub>	P <sub>med</sub>	S <sub>r</sub>
					2'	30'	2h																			
HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)																										
GRANULITA	Mirador Capelada	Ah1	4,5	3,9	11,2	11,1	11,4	11,4	4,7	9,7	51,9	0,71	15,8	2,9	11,6	12,1	18,8	15,9	14,8	18,1	25,5	1,1	0,4	0,2	3,8	0,07
		Ah2	4,9	4,2	11,7	11,6	12,0	9,3	1,7	5,6	36,0	0,43	15,3	1,1	16,6	16,9	23,8	22,0	7,6	9,2	29,0	1,6	1,5	2,5	2,6	
	Forte Vello	Ap1	5,5	4,5	9,3	9,7	9,7	9,0	40,6	3,1	15,7	0,30	12,2	0,3	4,2	5,8	12,2	8,9	6,4	18,8	55,0	1,3	1,0	4,5	17,0	
		Ap2	4,7	3,9	9,4	9,6	9,7	9,6	11,6	2,9	13,3	0,28	11,7	1,5	4,9	8,1	11,8	11,3	5,1	18,7	58,1	1,3	1,1	5,1	15,8	
		Ap3	4,7	3,8	9,6	9,8	9,9	10,1	4,2	2,6	12,1	0,26	11,6	2,0	6,3	9,9	10,3	12,5	7,7	20,8	64,3	1,6	1,3	6,0	15,1	
ESQUISTO	Adegahna	A	5,0	3,9	8,2	8,2	8,3	3,9	34,9	1,4	4,3	0,10	14,5	0,3	0,6	0,8	1,3	0,9	0,5	1,8	14,6	1,0	0,1	0,1	6,9	
	Gouveia	A	5,5	4,6	8,1	8,1	8,1	2,4	76,1	1,3	3,7	0,10	13,3	0,1	0,3	0,7	1,1	0,6	0,6	1,9	12,6	1,1	0,2	0,1	3,4	
	Sendim da Serra	A	5,8	5,1	8,5	8,6	8,7	3,4	83,7	0,8	3,0	0,05	15,2	0,0	0,4	1,7	2,7	2,2	0,6	5,1	38,3	1,2	0,2	1,8	9,5	
	P. Masanteo	Ah	4,4	3,8	10,3	10,4	10,6	14,2	4,4	8,5	31,8	0,74	13,4	3,1	9,5	10,4	10,5	13,0	9,5	14,9	18,1	1,4	1,4	2,4	3,1	0,06
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES B (N=17)																										
GABRO	Val do Dubra	B	5,2	4,2	9,4	9,7	9,9	5,1	16,4	1,0	4,4	0,08	15,5	0,4	4,8	5,6	11,4	29,5	3,0	8,2	68,0	1,2	1,0	7,2	0,3	0,03
	F. P. Cabaleira	BA	5,0	3,9	9,7	9,9	10,3	4,0	17,6	0,4	2,0	0,02	25,9	1,7	3,4	4,1	7,6	29,6	1,9	2,5	39,7	1,5	0,5	8,5	0,0	
ANFIBOLITA	E. Mera I	AB	4,8	3,9	10,3	10,2	10,5	8,5	2,4	4,1	15,9	0,25	19,2	2,1	9,1	9,6	9,9	14,4	14,1	21,6	51,5	1,7	1,1	3,4	5,5	
		B	4,9	4,1	10,3	10,7	11,0	5,5	2,3	1,3	5,5	0,09	16,8	1,2	8,6	8,7	13,0	16,4	9,4	13,8	41,0	1,7	1,4	3,3	2,9	0,04
	E. Mera II	B	4,8	4,2	9,5	9,8	10,2	4,6	9,1	1,0	8,9	0,08	14,2	1,0	7,5	8,9	9,1	16,2	7,0	7,7	24,8	1,7	0,7	3,0	2,5	
		B2	4,7	4,0	8,8	8,9	9,0	2,0	14,4	0,2	1,7	0,04	6,1	0,8	2,2	3,7	5,1	11,7	2,0	4,5	42,3	1,5	0,4	2,9	2,4	
		B3	4,6	3,8	8,9	8,9	9,2	3,4	10,9	0,3	1,5	0,02	20,2	1,1	3,4	3,5	4,9	10,8	3,6	4,2	43,3	1,7	0,4	4,4	2,2	0,03
Xinzo	B	4,7	4,0	9,8	9,8	10,0	5,0	3,9	1,2	7,7	0,10	14,4	1,4	5,8	6,1	8,4	19,3	5,9	4,9	44,5	1,5	0,5	3,4	3,2		
	Goias II	AB	4,6	4,3	11,7	11,5	11,8	7,8	6,8	5,4	27,1	0,37	16,9	1,4	10,8	20,0	23,3	24,7	1,7	14,0	70,0	1,5	4,7	8,6	1,8	
		B	5,2	4,2	10,5	10,3	10,7	5,1	7,2	1,1	6,6	0,09	14,7	0,8	5,2	7,2	21,2	17,6	5,4	4,3	84,1	1,2	1,4	8,0	1,2	
Coristanco	B	5,3	3,9	9,5	9,8	10,4	4,8	11,1	0,5	2,9	0,02	32,7	0,8	6,6	6,9	7,2	25,8	1,8	2,1	34,0	1,1	0,8	18,9	0,8		
	Breixa	B	6,1	4,7	9,2	9,2	9,5	8,8	79,7	1,1	3,8	0,08	16,3	0,0	5,0	5,1	11,7	8,3	16,1	16,4	41,3	2,0	1,5	8,1	2,9	
SERPENTINA	Melide	B	6,6	5,6	8,6	8,8	9,0	5,3	82,5	2,0	8,1	0,20	11,7	0,0	1,6	3,6	7,1	5,7	3,1	5,9	70,6	1,3	0,9	3,6	3,6	
Vilouriz	B	5,2	4,6	9,4	9,4	9,6	4,1	26,5	0,9	3,4	0,07	14,1	0,1	3,1	3,3	11,8	6,8	12,5	3,1	62,5	1,8	0,5	4,0	0,8	0,02	
	Campo Marzo	B	7,0	5,9	8,6	8,6	8,8	7,7	92,6	1,1	2,6	0,03	47,0	0,0	0,3	1,2	2,4	1,0	0,8	2,6	29,3	0,8	0,6	2,5	4,5	
	Morais II	B	5,3	4,4	8,6	8,9	8,9	3,2	56,5	0,4	2,2	0,02	18,8	0,1	1,2	1,3	1,6	3,3	1,2	3,3	38,0	1,3	0,2	2,3	8,1	
ESQUISTO	Sendin da Serra	B	4,2	3,7	9,9	9,9	10,0	12,7	3,6	7,8	29,9	0,68	13,4	3,5	8,7	9,0	9,2	13,1	11,0	16,3	36,8	1,5	1,1	2,0	1,8	
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES C (N=13)																										
GABRO	Val do Dubra	C	5,8	5,0	9,2	9,5	9,7	6,0	52,9	0,3	1,0	0,14	2,5	0,0	4,5	5,0	10,3	22,9	1,9	4,1	70,9	1,6	1,1	11,0	0,0	
	F. P. Cabaleira	2BC	5,0	3,7	9,6	9,9	10,0	7,2	14,7	0,2	2,1	0,08	2,4	5,1	2,4	3,5	12,6	22,5	1,7	3,2	69,1	1,1	0,6	9,5	0,0	0,05

Tabla 7.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H <sup>a</sup>	pH <sub>libro</sub>	pH <sub>KCl</sub>	pH <sub>Na</sub>			CIC	V	C <sub>r</sub>	C <sub>p</sub>	N <sub>r</sub>	C/N	g kg <sup>-1</sup>								P <sub>Quem</sub>	S <sub>r</sub>			
					2'	30'	2h							cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	%	%	g kg <sup>-1</sup>	%	mol:mol	Al <sub>e</sub>	Al <sub>p</sub>			Al <sub>s</sub>	Al <sub>o</sub>	Al <sub>h</sub>
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES C (N=13)																										
ANFIBOLITA	Xinzo	CB	5,0	3,9	9,3	9,4	9,5	5,3	3,5	0,5	3,4	0,04	13,3	1,5	4,0	4,1	8,0	27,1	3,4	5,0	61,3	1,4	0,6	5,8	2,5	0,02
	Monte Castro I	2BC	4,9	4,0	9,7	9,8	10,0	5,2	3,0	0,3	2,7	0,00	n.d.	1,7	3,9	4,1	4,1	9,2	2,3	2,1	28,5	1,5	0,8	4,8	2,1	
		2C	5,2	3,9	9,1	9,2	9,4	4,6	5,5	0,2	2,1	0,06	4,3	1,5	2,2	2,7	5,4	7,7	1,4	1,3	36,3	1,3	0,6	5,3	2,2	0,01
	Monte Castro II	BCr	5,1	4,3	10,3	11,0	11,3	4,2	3,1	1,3	11,5	0,09	16,7	1,0	6,4	8,2	10,3	10,9	9,9	20,3	42,0	1,6	0,6	2,8	4,7	0,02
Coristanco	Goias II	C	4,3	3,7	9,1	9,1	9,2	6,6	5,1	0,6	3,5	0,03	23,1	5,8	4,6	4,7	15,8	13,2	5,9	3,2	36,3	1,8	0,5	8,9	0,4	0,09
		CB	5,3	4,2	9,5	9,5	9,8	4,2	12,3	0,6	3,3	0,03	24,8	0,7	3,0	5,0	13,0	12,4	6,5	3,7	53,3	1,4	1,1	8,0	1,2	0,02
		C	5,9	4,2	8,9	9,1	9,5	5,7	50,4	0,2	1,6	0,06	3,8	0,2	2,4	2,8	4,3	23,6	1,4	2,3	53,8	1,5	0,6	21,8	0,8	0,01
	SERPENTINA	Melide	C	6,3	5,0	8,9	9,0	9,1	10,1	88,6	0,4	1,9	0,02	32,9	0,0	2,3	3,2	11,0	3,5	11,0	11,3	128,1	1,9	1,9	0,0	2,9
Pena Armada	Vilouriz	CB	6,7	5,9	8,3	8,8	8,5	5,4	71,6	0,6	2,4	0,06	11,8	0,0	0,5	1,1	4,4	2,0	1,4	5,2	64,7	1,4	0,9	2,1	2,0	0,07
		Cg	5,7	4,2	8,4	8,7	8,5	7,5	91,2	0,8	3,2	0,06	15,0	0,2	0,6	1,7	3,0	1,2	1,7	5,2	45,8	0,7	0,4	1,1	2,2	0,01
		P. Masanteo	C	4,8	3,9	9,0	9,2	9,3	4,1	5,1	0,5	2,5	0,04	17,1	0,7	3,1	3,2	3,5	28,3	2,8	3,3	20,0	1,3	0,6	3,5	0,6
media H, S <sub>r</sub>			5,2	4,4	10,3	10,4	10,5	10,2	24,4	6,0	25,4	0,5	15,3	1,0	8,1	12,5	15,5	15,5	5,8	10,7	45,8	1,4	2,2	4,5	4,7	0,1
media H, SS <sub>r</sub> , nivel signif.			5,3	4,3	9,4	9,5	9,8	5,8	28,3	1,2	5,8	0,1	16,7	1,2	4,2	5,2	9,0	14,6	5,0	6,8	51,0	1,5	0,9	6,0	2,2	0,0
			n.s. <sup>b</sup>	n.s.	** <sup>c</sup>	**	**	n.s.	n.s.	**	**	**	n.s.	n.s.	**	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	**	**	**

<sup>a</sup> H<sub>t</sub>: Horizontes de los perfiles estudiados  
<sup>b</sup> n.s.: Las diferencias entre las medias entre horizontes superficiales y subsuperficiales no fueron significativas a  $P < 0,05$ .  
<sup>c</sup> \*\*: Las diferencias entre las medias entre horizontes superficiales y subsuperficiales fueron significativas a  $P < 0,01$



## A<sub>nexo</sub> 2

---

### *Relaciones Al y Si*



Tabla 8.- Principales relaciones entre las distintas formas de Al y Si (extraíbles con pirofosfato, oxalato, ditionito-citrato y NaOH).

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	mol:mol								
			Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub>	Al <sub>1</sub> /Al <sub>2</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub> )/Si <sub>2</sub>	(Al <sub>2</sub> +Fe <sub>2</sub> )/C <sub>p</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub> )/(Si <sub>2</sub> -Si <sub>1</sub> )	Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub> )/Al <sub>2</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>1</sub> )/Al <sub>1</sub>
HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)											
GABRO	Val do Dubra	Ah1	8,93	0,21	0,55	1,19	0,18	7,20	15,48	0,44	0,01
		Ah2	30,94	0,39	0,20	2,41	0,16	4,46	5,91	0,13	0,01
	F. P. Cabaleira L. P. Cabaleira	A	10,25	5,74	0,67	2,30	0,21	6,08	10,62	0,25	0,15
		Ah1	6,30	4,63	0,78	2,57	0,16	-1,05	0,00	0,00	0,14
		Ah2	2,98	3,26	0,88	1,45	0,17	0,12	0,39	0,02	0,12
		Ah3	22,66	1,28	0,12	10,44	0,03	-0,50	0,00	0,00	0,05
		Ah4	17,30	0,37	0,48	4,04	0,21	-0,50	0,00	0,00	0,01
ANFIBOLITA	E. Mera I	Ah1	4,78	0,71	0,56	2,54	0,25	1,71	4,32	0,28	0,06
		Ah2	3,45	1,78	0,65	1,80	0,25	2,22	4,64	0,32	0,15
		Ah3	0,32	2,36	0,97	0,38	0,31	2,03	4,10	0,30	0,20
	E. Mera II Xinzo	A	1,28	2,16	0,87	0,96	0,28	2,86	4,59	0,32	0,18
		Ah1	0,46	2,79	0,97	0,25	0,20	2,01	4,35	0,22	0,16
		Ah2	1,32	8,06	0,93	0,69	0,21	4,72	11,79	0,40	0,31
	Monte Castro I	A	0,10	2,21	0,99	0,07	0,19	2,45	2,99	0,22	0,17
	Monte Castro II	A	2,18	2,28	0,84	1,81	0,18	5,40	3,01	0,18	0,14
	Goiás I	AR	12,66	10,08	0,48	2,37	0,16	0,81	2,10	0,08	0,29
	Goiás II	Ah	20,13	0,23	0,14	3,69	0,07	0,49	1,80	0,07	0,01
	Coristanco	A	2,23	12,28	0,83	0,97	0,18	1,20	3,00	0,18	0,48
	Breixa	Ah1	0,00	8,31	1,00	0,00	0,17	1,80	8,52	0,43	0,42
		Ah2	4,28	0,54	0,72	1,05	0,44	1,34	4,77	0,24	0,03
	A Golada	Ap1	0,60	1,98	0,90	0,92	0,34	0,62	2,65	0,31	0,25
		Ap2	0,23	1,23	0,97	0,33	0,36	0,74	3,81	0,36	0,15
	SERPENTINA	Melide	A	0,59	7,28	0,91	0,57	0,37	1,08	4,08	0,38
Vilouriz		A	2,53	3,11	0,49	2,58	0,14	-0,06	0,00	0,00	0,39
Pena Armada		A	2,79	0,73	0,55	2,36	0,15	0,00	0,00	0,00	0,10
Campo Marzo		A	0,97	6,91	0,79	0,88	0,37	0,63	1,29	0,22	0,60
Morais I		Ap	0,10	0,47	0,92	0,16	0,45	0,38	0,45	0,28	0,29
Morais II		A	0,54	0,00	0,58	1,43	0,23	-0,21	0,00	0,00	0,00
Limões		A	0,77	1,27	0,23	0,72	0,14	-0,53	0,00	0,00	0,56
Bragança		A	0,60	0,93	0,71	1,47	0,23	0,59	0,99	0,32	0,31
A Soeira		A	1,31	2,65	0,34	2,61	0,15	1,00	2,01	0,50	0,57



Tabla 8.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	mol:mol								
			Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub>	Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub>	Al <sub>i</sub> /Al <sub>i</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub> )/Si <sub>i</sub>	(Al <sub>i</sub> +Fe <sub>i</sub> )/C <sub>p</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub> )/(Si <sub>i</sub> -Si <sub>i</sub> )	Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub> )/Al <sub>i</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>i</sub> )/Al <sub>i</sub>
HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)											
GRANULITA	Mirador Capelada	Ah1	0,45	6,76	0,96	1,17	0,16	-21,26	3,88	0,24	0,36
		Ah2	0,30	6,90	0,98	0,21	0,25	5,57	5,14	0,23	0,29
	Forte Vello	Ap1	1,54	6,43	0,73	1,55	0,21	0,93	3,12	0,35	0,53
		Ap2	3,25	3,71	0,60	3,10	0,24	0,82	3,15	0,28	0,31
		Ap3	3,65	0,35	0,63	2,90	0,37	0,58	2,61	0,21	0,03
ESQUISTO	Adegahna	A	0,26	0,48	0,68	2,26	0,08	n.d.	0,09	0,10	0,37
	Gouveia	A	0,40	0,41	0,45	2,16	0,07	1,25	0,00	0,00	0,36
	Sendim da Serra	A	1,29	1,00	0,25	8,92	0,11	0,30	0,48	0,22	0,37
GNEIS	P. Masanteo	Ah	0,90	0,15	0,91	0,67	0,20	2,78	2,67	0,21	0,01
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES B (N=17)											
GABRO	Val do Dubra	B	0,78	5,80	0,86	0,85	0,63	3,98	23,88	0,81	0,51
	F. P. Cabaleira	BA	0,65	3,58	0,84	1,47	0,94	3,31	25,53	0,86	0,47
ANFIBOLITA	E. Mera I	AB	0,55	0,28	0,94	0,55	0,45	2,10	4,77	0,33	0,03
		B	0,07	4,30	0,99	0,06	1,06	4,16	7,68	0,47	0,33
	E. Mera II	B	1,45	0,16	0,84	2,19	0,54	3,35	7,33	0,45	0,02
		B2	1,43	1,41	0,61	3,80	0,85	3,41	8,05	0,69	0,28
		B3	0,05	1,43	0,99	0,14	1,55	1,88	7,38	0,68	0,29
	Xinzo	B	0,27	2,34	0,95	0,53	0,50	4,83	13,22	0,68	0,28
		AB	9,16	3,27	0,54	2,02	0,19	1,25	4,68	0,19	0,14
	Goias II	B	2,00	13,99	0,72	1,51	0,52	1,63	10,44	0,59	0,66
		Coristanco	B	0,23	0,34	0,97	0,28	1,14	1,09	18,98	0,73
	SERPENTINA	Breixa	B	0,03	6,64	1,00	0,02	1,50	0,50	3,20	0,39
Melide		B	1,98	3,46	0,45	2,21	0,17	0,83	2,10	0,37	0,49
Vilouriz		B	0,13	8,50	0,96	0,24	1,19	1,07	3,50	0,52	0,72
Campo Marzo		B	0,87	1,23	0,26	1,42	0,12	-0,08	0,00	0,00	0,51
ESQUISTO	Morais II	B	0,03	0,38	0,97	0,20	0,36	1,03	2,07	0,62	0,23
	Sendin da Serra	B	0,27	0,24	0,97	0,27	0,21	4,34	4,13	0,32	0,03
GNEIS	P. Masanteo	B	0,27	0,24	0,97	0,27	0,21	4,34	4,13	0,32	0,03

Tabla 8.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	mol:mol									
			Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> -Al <sub>4</sub>	Al <sub>3</sub> /Al <sub>4</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub> )/Si <sub>4</sub>	(Al <sub>2</sub> +Fe <sub>3</sub> )/C <sub>p</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub> )/(Si <sub>2</sub> -Si <sub>4</sub> )	Al <sub>2</sub> -Al <sub>5</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub> )/Al <sub>5</sub>	(Al <sub>2</sub> -Al <sub>3</sub> )/Al <sub>4</sub>	
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES C (N=13)												
GABRO	Val do Dubra	C	0,43	5,30	0,91	0,40	2,37	1,88	17,97	0,78	0,52	
	F. P. Cabaleira	2BC	1,16	9,12	0,67	2,12	0,69	2,20	18,96	0,84	0,72	
ANFIBOLITA	Xinzo	CB	0,08	3,95	0,98	0,12	0,74	4,62	23,01	0,85	0,49	
	Monte Castro I	2BC	0,15	0,07	0,96	0,19	0,83	1,34	5,16	0,56	0,02	
	2C	2C	0,48	2,74	0,82	0,90	0,61	1,10	4,98	0,65	0,50	
	Monte Castro II	BCr	1,77	2,06	0,78	3,17	0,44	1,25	2,70	0,25	0,20	
SERPENTINA	Goiás II	C	0,07	11,05	0,98	0,14	0,94	1,06	8,47	0,64	0,70	
	Coristanco	CB	2,02	7,96	0,60	1,91	0,84	1,11	7,32	0,59	0,61	
	Breixa	C	0,45	1,45	0,84	0,78	0,83	1,02	20,84	0,88	0,34	
	Melide	C	0,88	7,85	0,72	0,47	1,74	-0,19	0,36	0,10	0,71	
GNEIS	Vilouriz	CB	0,63	3,36	0,42	0,75	0,21	0,74	0,87	0,45	0,76	
	Pena Armada	Cg	1,14	1,29	0,34	3,38	0,19	-0,63	0,00	0,00	0,43	
GNEIS	P. Masanteo	C	0,15	0,30	0,95	0,26	0,78	8,99	25,12	0,89	0,09	
	media H. S.		4,4	3,1	0,7	1,9	0,2	1,0	3,2	0,2	0,2	
	media H. SS.		1,0	3,8	0,8	1,1	0,8	2,1	9,4	0,5	0,4	
	nivel signif.		b **	c n.s.	d *	**	**	*	**	**	**	

<sup>a</sup> H.: Horizontes de los perfiles estudiados  
<sup>b</sup> \*\*: Las diferencias entre las medias entre horizontes superficiales y subsuperficiales fueron significativas a  $P < 0,01$ .  
<sup>c</sup> n.s.: Las diferencias entre las medias entre horizontes superficiales y subsuperficiales no fueron significativas a  $P < 0,05$ .  
<sup>d</sup> \*: Las diferencias entre las medias entre horizontes superficiales y subsuperficiales fueron significativas a  $P < 0,05$ .



## Anexo 3

---

### *Capacidad de Intercambio de Cationes*



Tabla 9- Características principales del Complejo de Intercambio de Cationes.

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	CIC	SB	CICe	V <sup>b</sup>
			cmole <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>			cmole <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>			cmole <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	%	
HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)											
GABRO	Val do Dubra	Ah1	0.07	0.08	0.10	0.06	0.39	12.00	0.30	0.69	2.52
		Ah2	0.07	0.06	0.25	0.07	0.14	14.44	0.44	0.58	3.08
	F. P. Cabaleira L. P. Cabaleira	A	0.07	0.08	0.17	0.09	1.05	12.54	0.41	1.46	3.25
		Ah1	0.11	0.19	0.85	0.25	2.07	21.20	1.41	3.48	6.66
		Ah2	0.06	0.13	0.54	0.07	2.62	22.76	0.80	3.42	3.53
		Ah3	0.04	0.05	0.13	0.04	1.46	19.06	0.26	1.72	1.36
		Ah4	0.04	0.03	0.13	0.03	0.79	13.36	0.23	1.02	1.72
ANFIBOLITA	E. Mera I	Ah1	0.04	0.09	0.04	0.02	1.48	9.54	0.19	1.68	2.03
		Ah2	0.06	0.13	0.05	0.03	1.79	8.78	0.27	2.06	3.07
		Ah3	0.05	0.12	0.04	0.02	2.68	9.66	0.23	2.92	2.40
	E. Mera II Xinzo	A	0.09	0.15	0.05	0.07	1.31	7.12	0.35	1.67	4.96
		Ah1	0.08	0.17	0.13	0.08	2.07	11.82	0.46	2.53	3.90
		Ah2	0.07	0.05	0.03	0.06	2.15	14.92	0.21	2.37	1.42
	Monte Castro I	A	0.10	0.07	0.42	0.18	1.58	10.66	0.77	2.35	7.18
	Monte Castro II	A	0.11	0.05	0.56	0.42	2.18	16.74	1.13	3.32	6.78
	Goiás I	AR	0.13	0.09	1.68	0.18	0.43	12.64	2.08	2.52	16.46
	Goiás II	Ah	0.27	0.11	2.24	0.33	0.50	15.04	2.94	3.45	19.56
	Coristanco	A	0.39	0.08	0.49	0.22	1.68	12.04	1.18	2.85	9.77
	Breixa	Ah1	0.06	0.08	0.37	0.17	1.49	9.76	0.67	2.16	6.90
		Ah2	0.04	0.02	0.06	0.04	0.55	6.88	0.17	0.72	2.40
	A Golada	Ap1	0.08	0.12	0.49	0.18	1.75	6.16	0.86	2.61	14.03
		Ap2	0.08	0.07	0.45	0.13	1.96	6.02	0.73	2.69	12.06
	SERPENTINA	Melide	A	0.10	0.08	0.32	1.31	0.74	7.42	1.81	2.55
Vilouriz		A	0.15	0.10	1.07	4.84	0.02	8.76	6.16	6.18	70.29
Pena Armada		A	0.20	0.15	1.50	3.06	0.25	7.70	4.91	5.17	63.80
Campo Marzo		A	0.09	0.05	0.42	1.83	0.10	4.62	2.39	2.49	51.75
Morais I		Ap	0.10	0.03	1.96	2.20	0.00	6.18	4.28	4.28	69.25
Morais II		A	0.08	0.12	1.75	4.14	0.00	7.88	6.09	6.09	77.23
Limões		A	0.04	0.08	0.81	3.06	0.00	6.36	3.99	3.99	62.81
Bragança		A	0.08	0.08	1.73	3.26	0.08	7.16	5.15	5.22	71.87
A Soeira		A	0.12	0.05	2.46	1.21	0.01	4.38	3.84	3.85	87.66



Tabla 9.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Al <sup>+3</sup>	CIC	SB	CICe	V. <sup>b</sup>
			cmolc <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>						cmolc <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>	%	
HORIZONTES SUPERFICIALES (N=40)											
GRANULITA	Mirador Capelada	Ah1	0.09	0.06	0.17	0.21	3.23	11.36	0.53	3.76	4.68
		Ah2	0.03	0.04	0.06	0.03	1.17	9.34	0.16	1.33	1.68
	Forte Vello	Ap1	0.17	0.08	1.71	1.70	0.30	9.02	3.66	3.96	40.55
		Ap2	0.08	0.08	0.49	0.46	1.72	9.62	1.11	2.83	11.57
		Ap3	0.06	0.04	0.18	0.15	2.22	10.10	0.42	2.65	4.21
ESQUISTO	Adegahna	A	0.05	0.16	0.96	0.21	0.35	3.94	1.38	1.73	34.93
	Gouveia	A	0.06	0.12	1.43	0.24	0.11	2.42	1.84	1.95	76.15
	Sendim da Serra	A	0.15	0.21	2.00	0.45	0.01	3.36	2.81	2.83	83.70
	P. Masanteo	Ah	0.26	0.16	0.09	0.12	3.49	14.18	0.63	4.12	4.43
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES B (N=17)											
GABRO	Val do Dubra	B	0.10	0.10	0.24	0.39	0.45	5.08	0.83	1.28	16.37
	F. P. Cabaleira	BA	0.13	0.21	0.19	0.18	1.88	4.04	0.71	2.59	17.56
ANFIBOLITA	E. Mera I	AB	0.05	0.10	0.03	0.02	2.29	8.50	0.20	2.49	2.35
		B	0.03	0.06	0.03	0.01	1.29	5.52	0.13	1.42	2.29
	E. Mera II	B	0.17	0.13	0.05	0.07	1.09	4.58	0.42	1.50	9.09
		B2	0.05	0.12	0.04	0.09	0.91	2.02	0.29	1.20	14.37
		B3	0.09	0.14	0.04	0.12	1.22	3.44	0.38	1.60	10.91
	Xinzo	B	0.10	0.02	0.03	0.05	1.58	5.02	0.20	1.78	3.90
		AB	0.08	0.10	0.30	0.06	1.50	7.80	0.53	2.03	6.77
	Goias II	B	0.16	0.01	0.06	0.14	0.90	5.12	0.37	1.27	7.21
		Coristanco	B	0.32	0.01	0.07	0.13	0.94	4.78	0.53	1.47
SERPENTINA	Melide	B	0.12	0.03	0.18	6.68	0.04	8.80	7.01	7.05	79.66
	Vilouriz	B	0.10	0.05	0.69	3.55	0.00	5.32	4.39	4.40	82.54
	Campo Marzo	B	0.07	0.02	0.05	0.96	0.14	4.14	1.10	1.24	26.52
		B	0.09	0.20	1.47	5.35	0.00	7.66	7.10	7.10	92.65
ESQUISTO	Morais II	B	0.09	0.20	1.47	5.35	0.00	7.66	7.10	7.10	92.65
	Sendin da Serra	B	0.15	0.23	1.08	0.33	0.11	3.16	1.79	1.89	56.53
GNEIS	Sendin da Serra	B	0.17	0.13	0.07	0.09	3.87	12.72	0.46	4.33	3.58
	P. Masanteo	B	0.17	0.13	0.07	0.09	3.87	12.72	0.46	4.33	3.58

Tabla 9.- Continuación

MATERIAL DE PARTIDA	MUESTRA	H. <sup>a</sup>	cmolc. <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>				Al <sup>+3</sup>	cmolc. <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup>				V <sup>b</sup> %
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>		CIC	SB	CICe		
HORIZONTES SUBSUPERFICIALES C (N=13)												
GABRO	Val do Dubra	C	0.25	0.12	1.18	1.63	0.00	6.00	3.17	3.18	52.90	
	F. P. Cabaleira	2BC	0.20	0.03	0.38	0.44	5.69	7.16	1.05	6.74	14.65	
ANFIBOLITA	Xinzo	CB	0.13	0.02	0.03	0.01	1.67	5.31	0.18	1.86	3.48	
	Monte Castro I	2BC	0.04	0.01	0.06	0.05	1.92	5.18	0.15	2.07	2.97	
		2C	0.06	0.01	0.07	0.12	1.62	4.58	0.25	1.87	5.48	
	Monte Castro II	BCr	0.03	0.01	0.04	0.06	1.13	4.22	0.13	1.26	3.07	
	Goiás II	C	0.06	0.13	0.05	0.10	6.45	6.62	0.34	6.79	5.10	
	Coristanco	CB	0.19	0.01	0.12	0.20	0.76	4.20	0.52	1.27	12.30	
	Breixa	C	0.61	0.01	0.92	1.36	0.20	5.74	2.90	3.10	50.44	
SERPENTINA	Melide	C	0.13	0.04	0.37	8.43	0.01	10.12	8.97	8.98	88.64	
	Vilouriz	CB	0.04	0.03	0.25	3.55	0.01	5.40	3.87	3.87	71.62	
	Pena Armada	Cg	0.12	0.02	1.01	5.65	0.19	7.46	6.80	6.99	91.21	
GNEIS	P. Masanteo	C	0.14	0.02	0.03	0.03	0.80	4.14	0.21	1.01	5.14	

<sup>a</sup> H.: Horizontes de los perfiles estudiados  
<sup>b</sup> V: El tanto por cien de saturación en bases de cambio se ha realizado en función de la CIC.



## Anexo 4

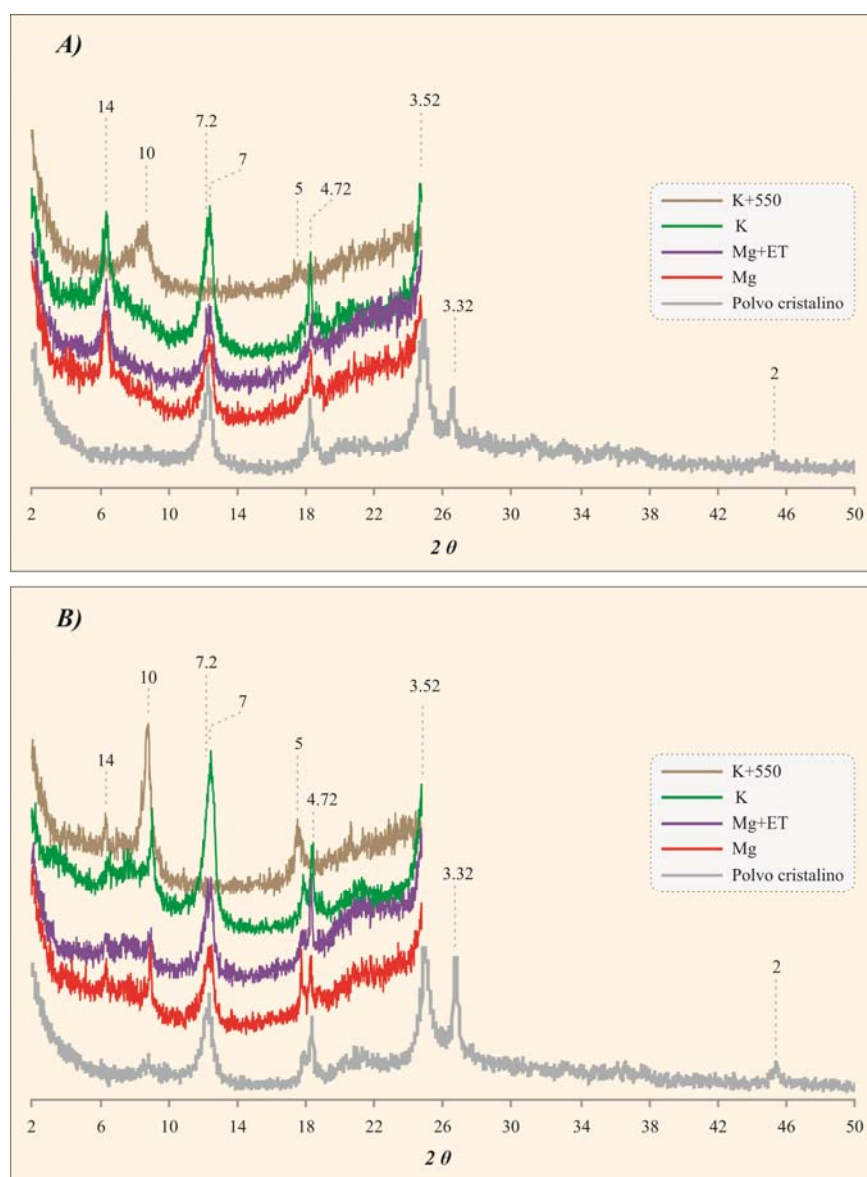
---

### *Mineralogía de la fracción arcilla*



## MINERALOGIA DE LOS PERFILES DESARROLLADOS A PARTIR DE ANFIBOLITAS

## 1.- Perfil de Estación de Mera II



**Fig. 16.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Estación de Mera II incluido en el Complejo de Cabo Ortegal: **A)** horizonte A; **B)** horizonte B<sub>3</sub>.

**Tabla 10.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de Estación de Mera II. Los especiados se expresan en Å. <sup>1,2</sup> Presente en horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Clorita</b> <sup>1</sup>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14	14-7-4,72-3,52
<b>Vermiculita</b> **	14	14	14	aumento a 10	14
<b>Caolinita</b> **	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
<b>Ilita</b> **	10-5	10-5	10-5	10-5	10-5-2
<b>Cuarzo</b> **					3,32



2.- Perfil de Xinzo

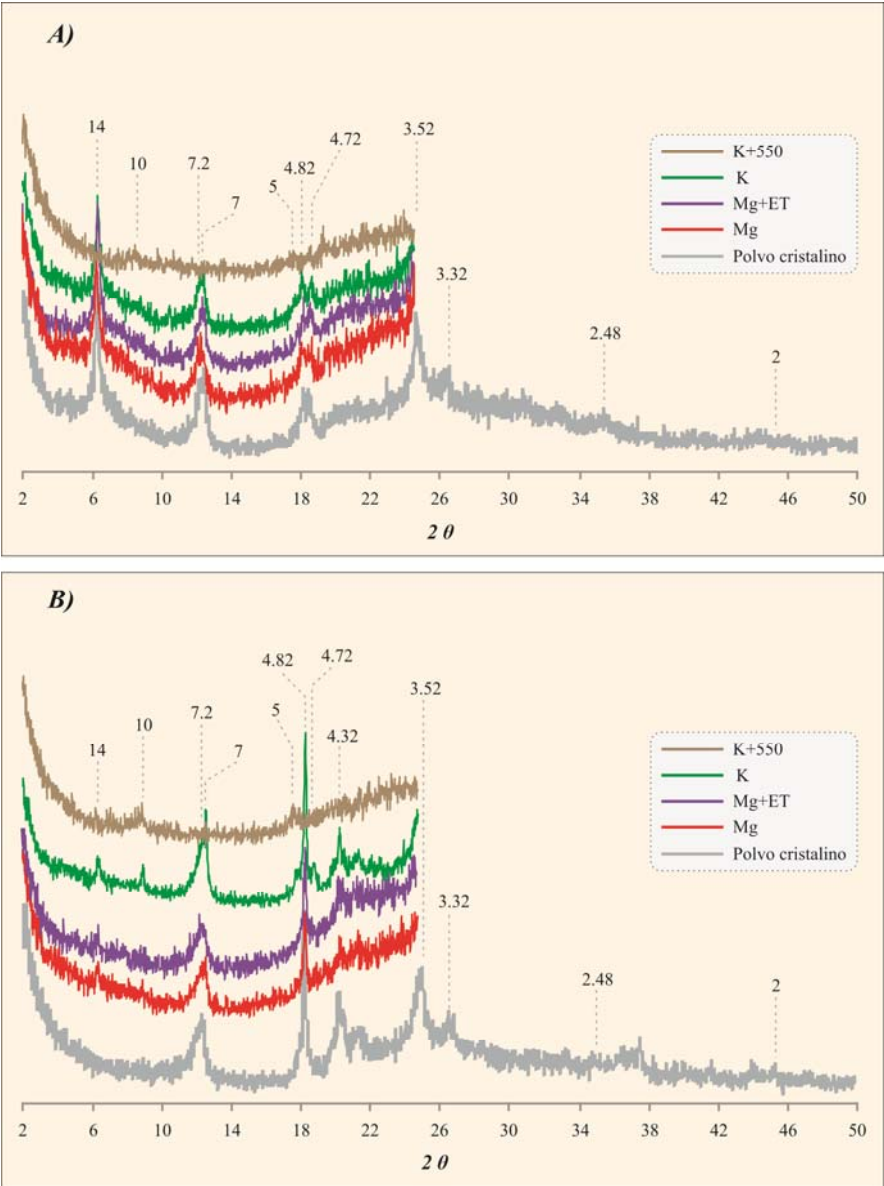
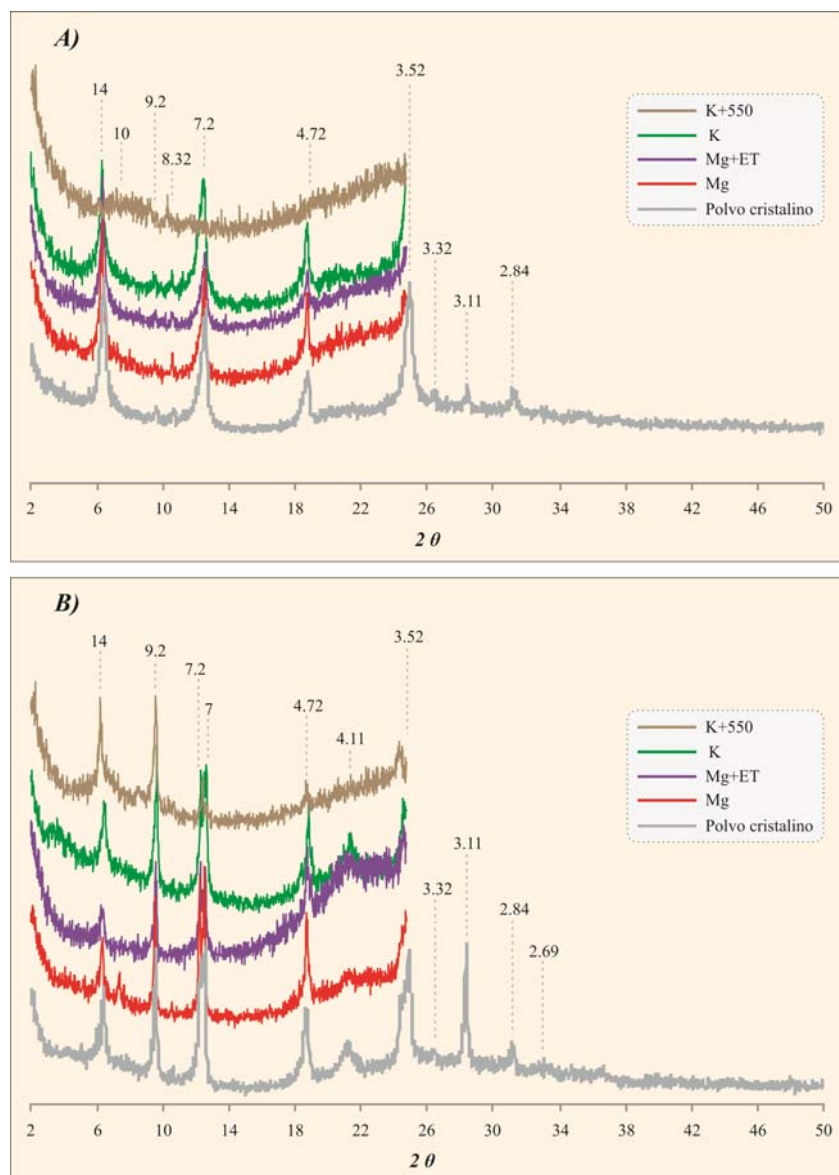


Fig. 17.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Xinzo incluido en Complejo de Rocas de Melide: A) horizonte Ah<sub>1</sub>; B) horizonte BC.

Tabla 11.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Xinzo. Los especiados se expresan en Å. <sup>2</sup> Presente en el horizonte subsuperficial; \*\* presente en ambos horizontes.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Clorita <sup>2</sup>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	-	14-4,72-3,52
Vermiculita**	14	14	14	banda a 10	-
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
Gibbsita**	4,82-4,32	4,82-4,32	4,82-4,32	amorfo	4,82-4,32
Ilita**	10-5	10-5	10-5	10-5	10-5-2
Cuarzo**					3,32-2,48

## 3.- Perfil de Monte Castro II



**Fig. 18.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Monte Castro II incluido en el Complejo de Rocas de Melide: **A)** horizonte A; **B)** horizonte C.

**Tabla 12.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de Monte Castro II. Los espaciados se expresan en Å. <sup>1,2</sup> Presente en horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Clorita</b> <sup>2</sup>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7	14-7-4,72-3,52-2,84
<b>Vermiculita</b> <sup>1</sup>	14	14	14	banda a 10	14
<b>Caolinita</b> **	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
<b>Talco</b> **	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2-3,11
<b>Goethita</b> <sup>2</sup>	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11-2,69
<b>Anfibol</b> <sup>1</sup>	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
<b>Cuarzo</b> **					3,32

## 4.- Perfil de Breixa

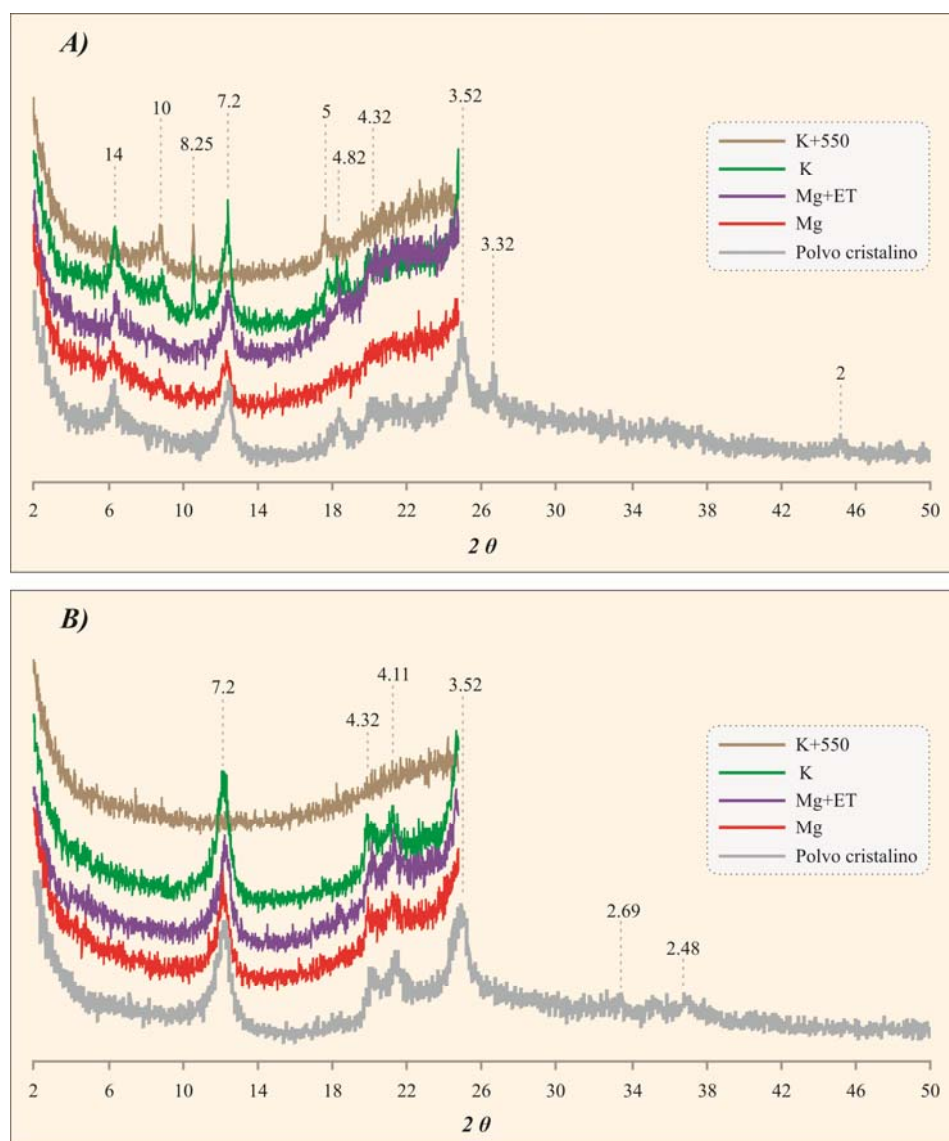


Fig. 19.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Breixa incluido en La Unidad de Lalín: A) horizonte Ah<sub>1</sub>; B) horizonte C.

Tabla 13.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Breixa. Los especiados se expresan en Å. <sup>1,2</sup> Presente en horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Vermiculita <sup>1</sup>	14	14	14	banda a 10	14
Anfibol <sup>1</sup>	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
Ilita <sup>1</sup>	10-5	10-5	10-5	10-5	10-5-2
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
Goethita <sup>2</sup>	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11-2,69
Gibbsita**	4,82-4,32	4,82-4,32	4,82-4,32	amorfo	4,82-4,32
Cuarzo <sup>1</sup>					3,32-2,48

5.- Perfil de Agolada

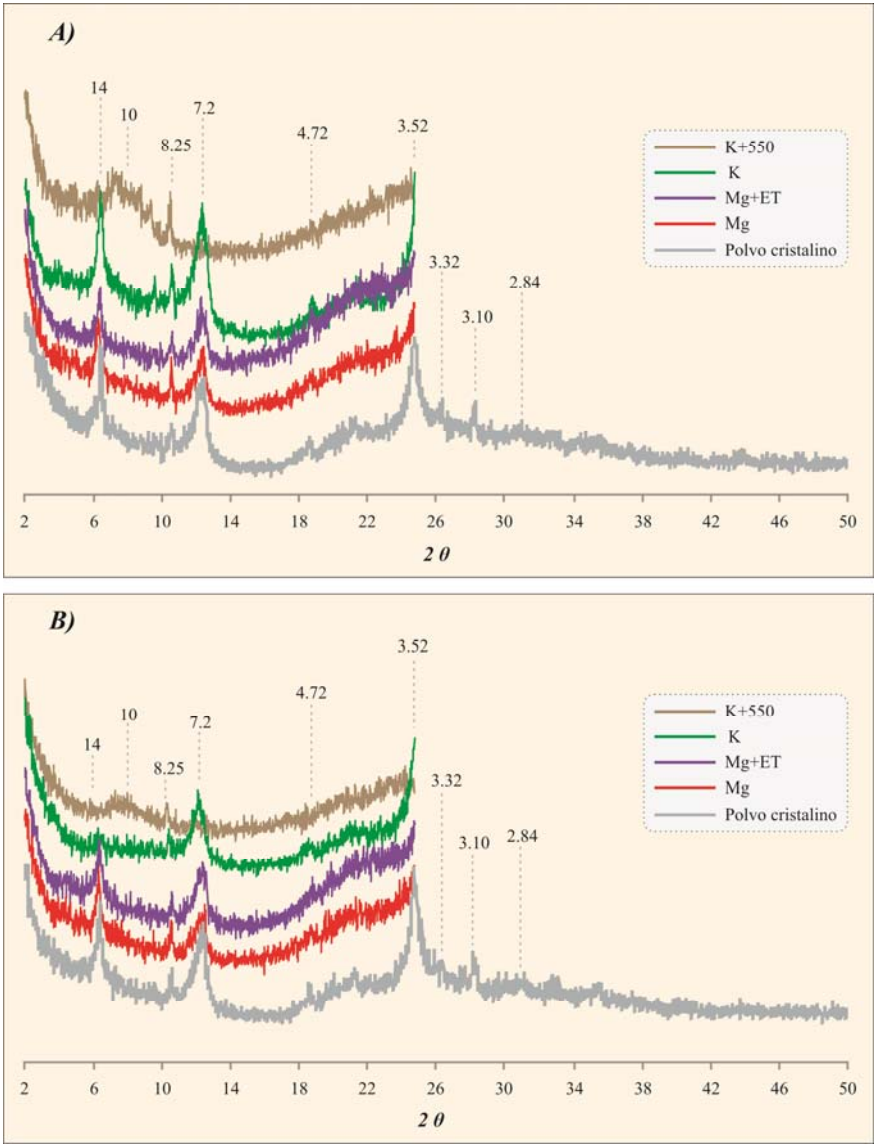


Fig. 20.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Agolada incluido en el Complejo de Rocas de Melide: A) horizonte Ap<sub>1</sub>; B) horizonte Ap<sub>2</sub>.

Tabla 14.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Agolada. Los espaciados se expresan en Å. \*\* presente en ambos horizontes.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Vermiculita**	14-4,72	14-4,72	14-4,72	banda a 10-4,72	14-4,72
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
Anfíbol**	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25-3,10
Cuarzo**					3,32-2,48

6.- Perfil de Coristanco

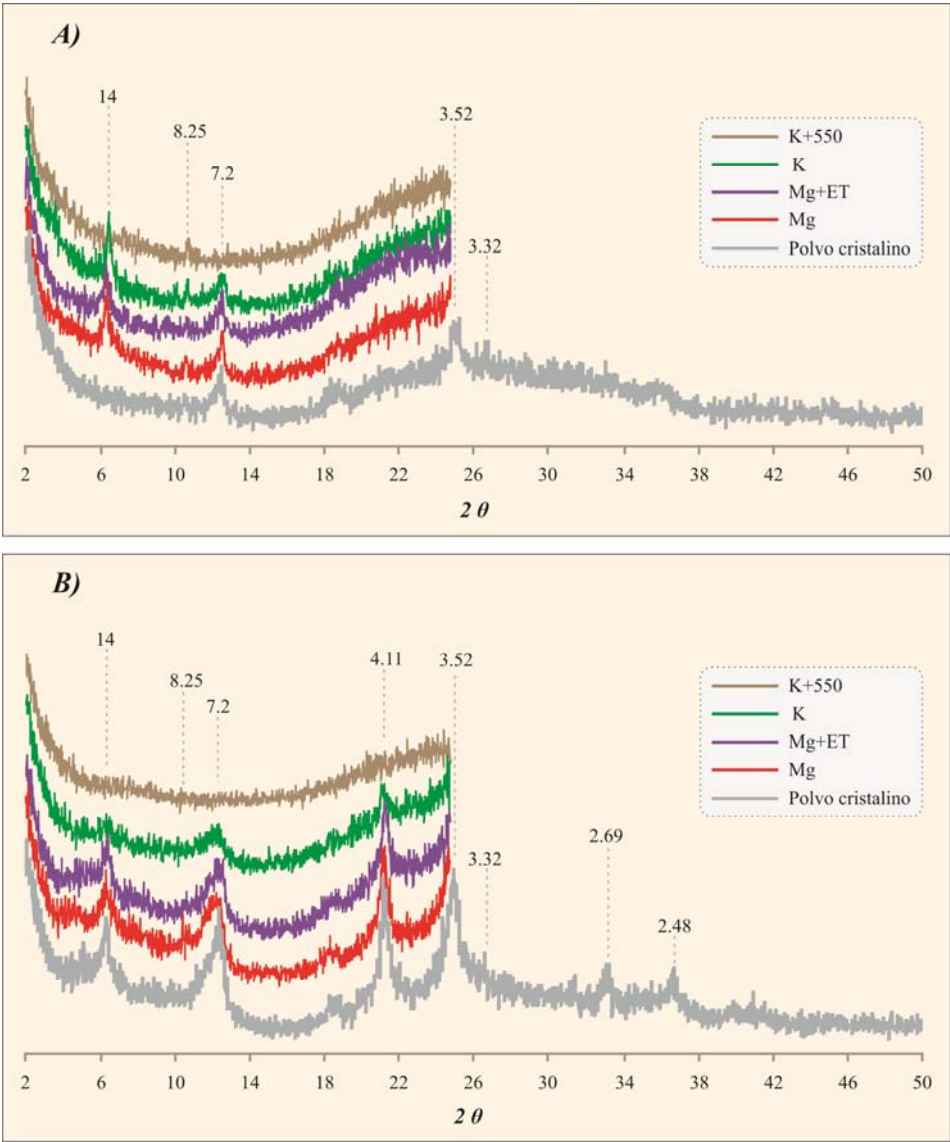


Fig. 21.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Coristanco incluido en el Complejo de Órdenes: A) horizonte A; B) horizonte C.

Tabla 15.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Coristanco. Los especiados se expresan en Å. <sup>2</sup> Presente en el horizonte subsuperficial; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Vermiculita**	14	14	14	Banda a 10	14
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Anfíbol**	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25
Goethita <sup>2</sup>	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11-2,69
Cuarzo**					3,32-2,48

7.- Perfil de Goias I

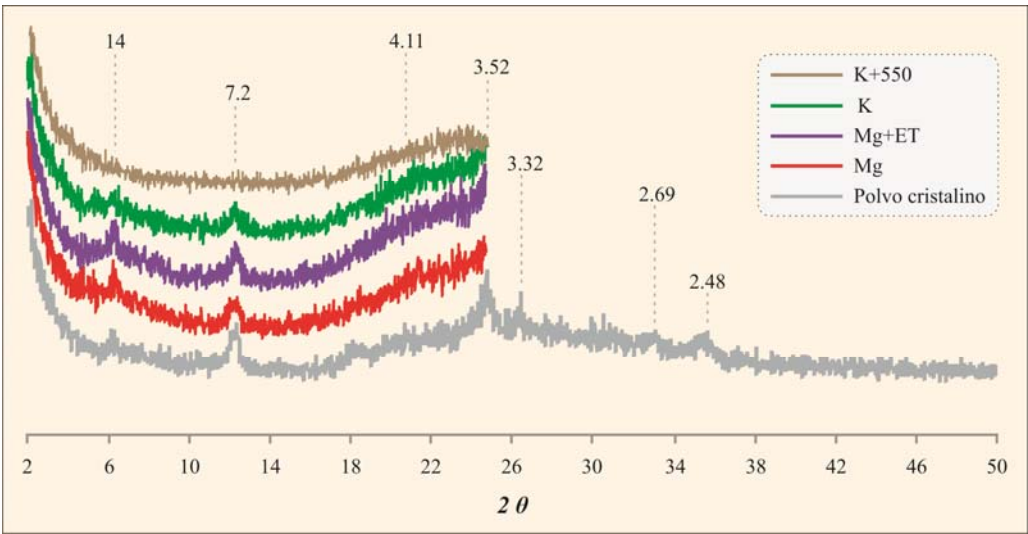


Fig. 22.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Goias I incluido en el Complejo de Órdenes.

Tabla 16.- Composición mineralógica del horizonte de perfil de Goias I. Los espaciados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Vermiculita	14	14	14	Banda a 10	14
Caolinita	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
Goethita	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11-2,69
Cuarzo					3,32-2,48



MINERALOGIA DE LOS PERFILES DESARROLLADOS A PARTIR DE SEPENTINAS Y PERIDOTITAS

1.- Perfil de Melide

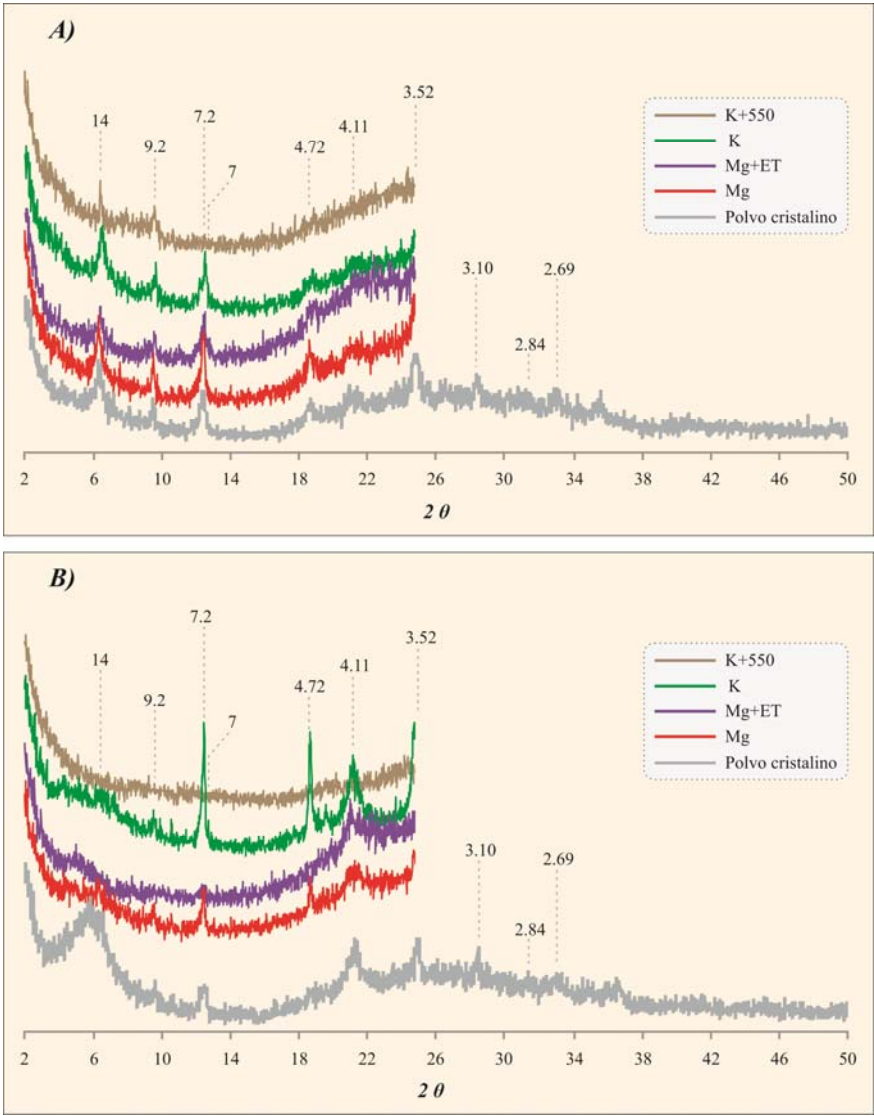
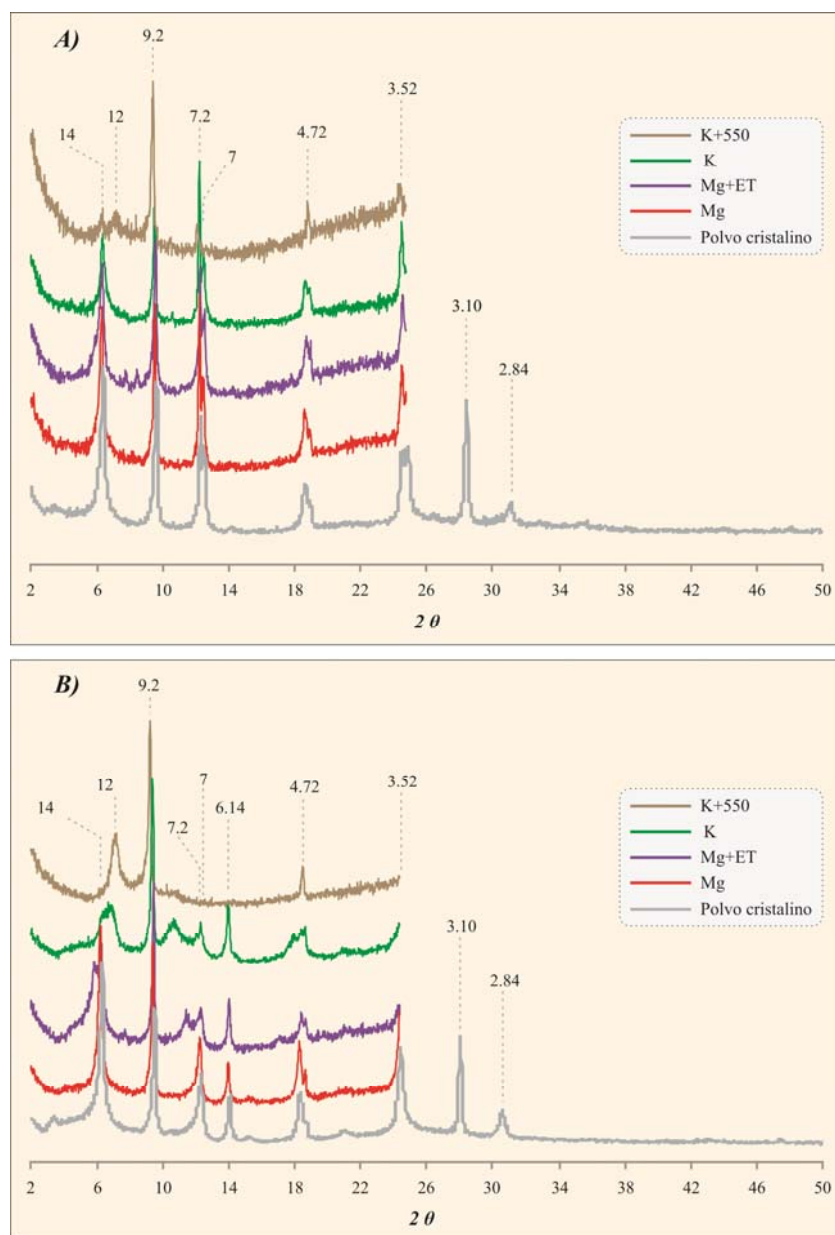


Fig. 23- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Melide incluido en el Complejo de Rocas de Melide: A) horizonte A; B) horizonte C.

Tabla 17.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Melide. Los espaciados se expresan en Å. <sup>1, 2</sup> Presente en horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Clorita <sup>1</sup>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14	14-4,7-2,84
Vermiculita <sup>2</sup>	14	14	14	Banda a 10	14
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Talco**	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2/3,10
Goethita**	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11/2,69

## 2.- Perfil de Pena Armada

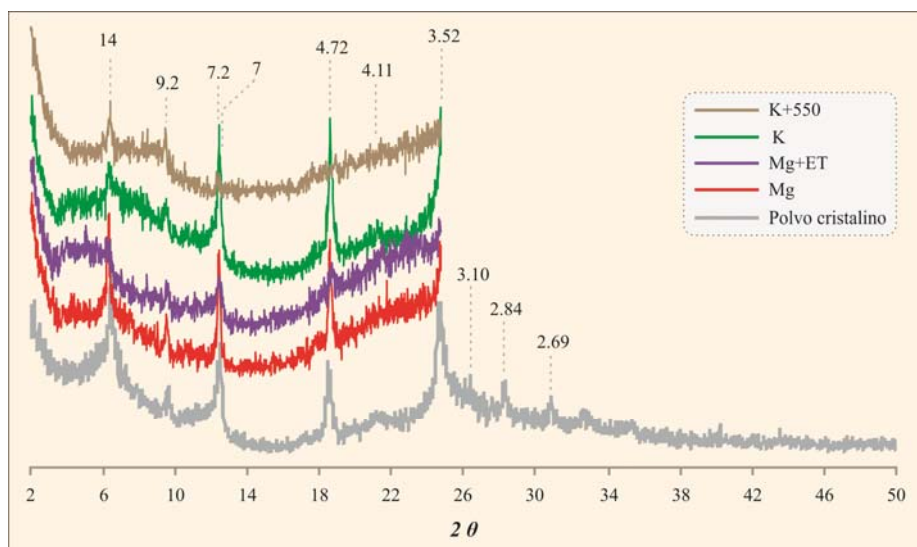


**Fig. 24.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Pena Armada incluido en el Complejo de Rocas de Melide: **A)** horizonte A; **B)** horizonte Cg.

**Tabla 18.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de Pena Armada. Los espaciados se expresan en Å. <sup>1,2</sup> Presente en horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente; \*\* presente en ambos.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Clorita-vermiculita**</b>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	12-7-4,72	14-7-4,72-2,84
<b>Caolinita**</b>	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
<b>Talco**</b>	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2-3,10
<b>Ferromagnesiano<sup>2</sup> ?</b>	6,14	6,14	6,14	amorfo	6,14

## 2.- Perfil de Morais I

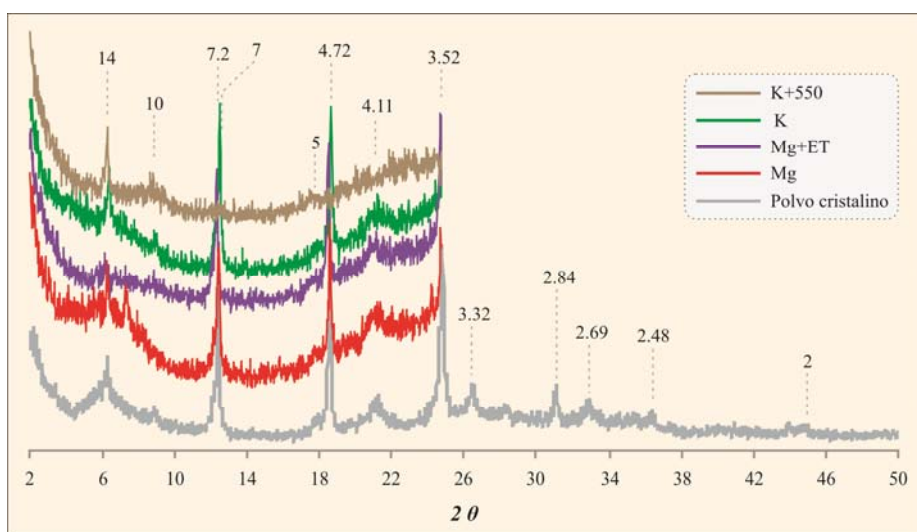


**Fig. 25.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Morais I incluido en el Complejo Alóctono Superior.

**Tabla 19.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de Morais I. Los espaciados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Clorita</b>	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7	14-7-4,72-2,84
<b>Caolinita</b>	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2-3,52
<b>Talco</b>	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2-3,10
<b>Goethita</b>	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11-2,69

## 3.- Perfil de Limãos



**Fig. 26.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Limãos incluido en la Unidad de Morais-Talhinhas.

Tabla 20.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Limãos. Los especiados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Clorita	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7	14-7-4,72-2,84
Caolinita	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Ilita	10-5	10-5	10-5	10-5	10-5-2
Goethita	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11/2,69
Cuarzo					3,32-2,48

4.- Perfil de Bragança

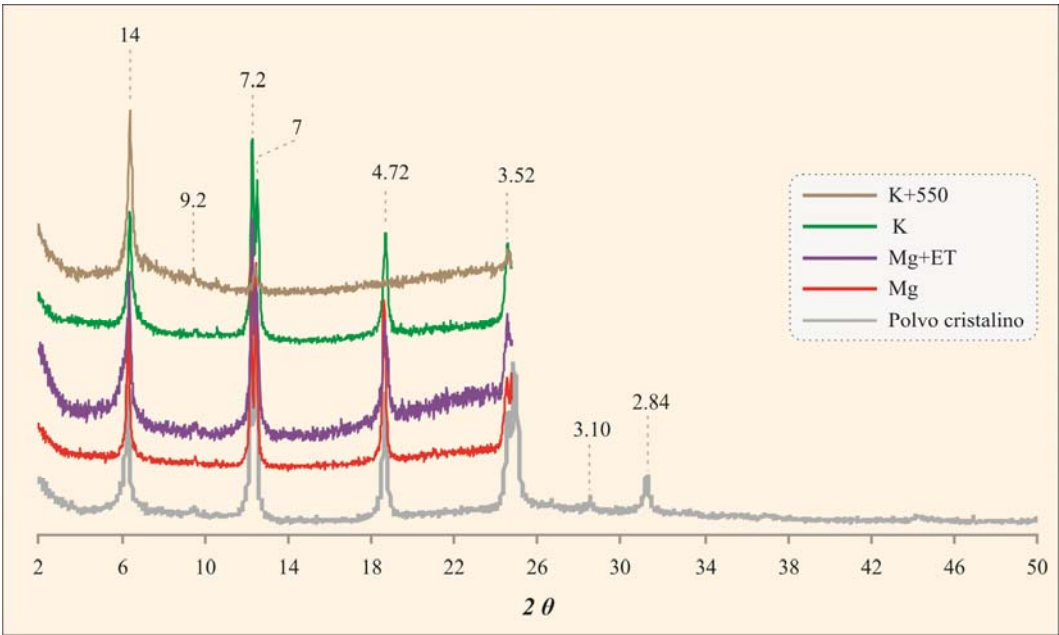
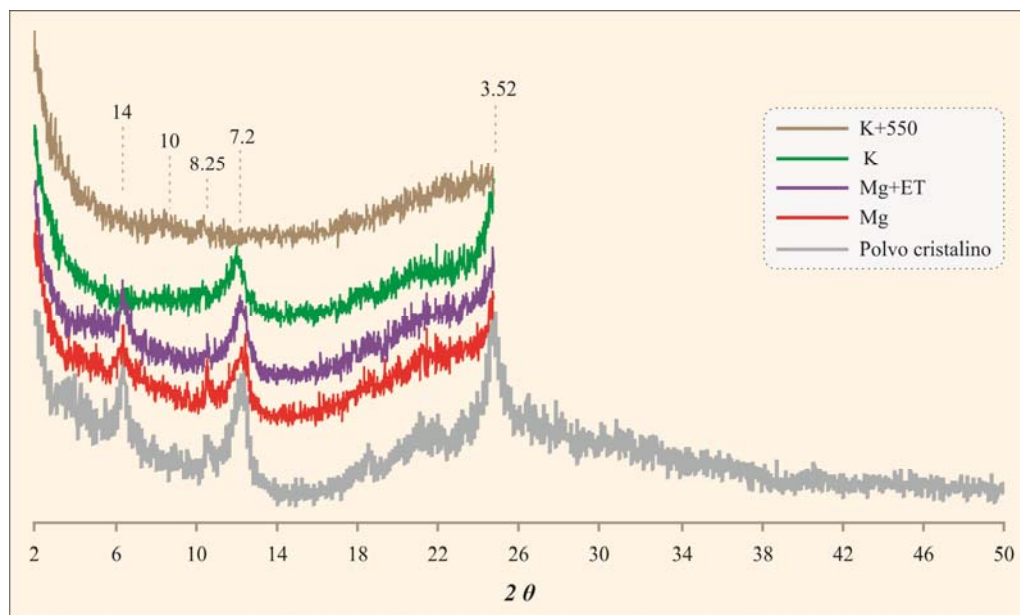


Fig. 27.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Bragança incluido en el Macizo de Bragança.

Tabla 21.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Bragança. Los especiados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Clorita	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7	14-7-4,72-2,84
Caolinita	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Talco	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2/3,10

## 5.- Perfil de A Soeira



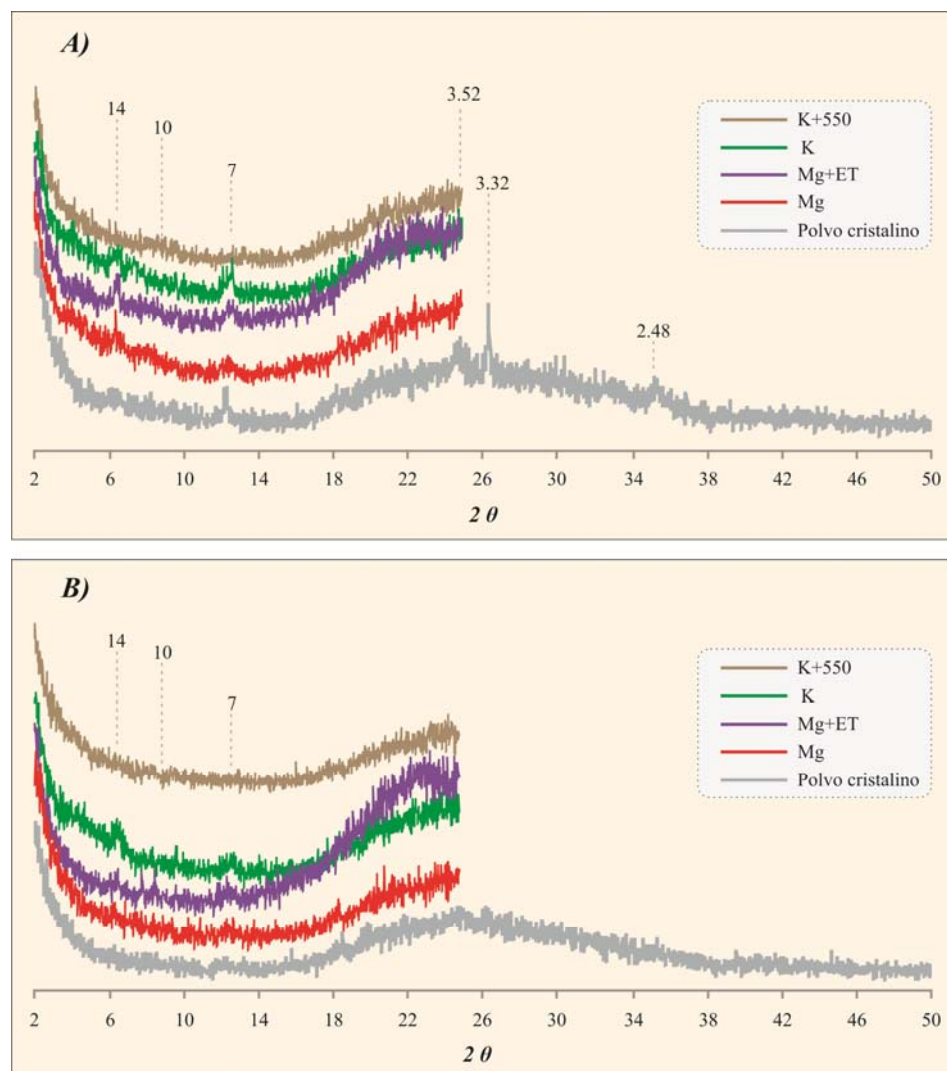
**Fig. 28.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de A Soeira incluido en el Macizo de Bragança.

**Tabla 22.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de A Soeira. Los especiados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Vermiculita</b>	14	14	14	banda a 10	14
<b>Caolinita</b>	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
<b>Anfíbol</b>	8,25	8,25	8,25	8,25	8,25

## MINERALOGIA DE LOS PERFILES DESARROLLADOS A PARTIR DE GABROS

## 1.- Perfil de Ladeira de Pena Cabaleira



**Fig. 29.-** Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Ladeira de Pena Cabaleira incluido en el Macizo Gabroico de Monte Castelo: **A)** horizonte Ah<sub>1</sub>; **B)** horizonte Ah<sub>4</sub>.

**Tabla 23.-** Composición mineralógica los horizontes del perfil de Ladeira de Pena Cabaleira. Los espaciados se expresan en Å. <sup>1</sup> presente en el horizonte superficial; \*\* presente en ambos horizontes.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Vermiculita**	14	14	14	Banda a 10	14
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Cuarzo <sup>1</sup>					3,32-2,48



## 2.- Perfil de Fonte de Pena Cabaleira

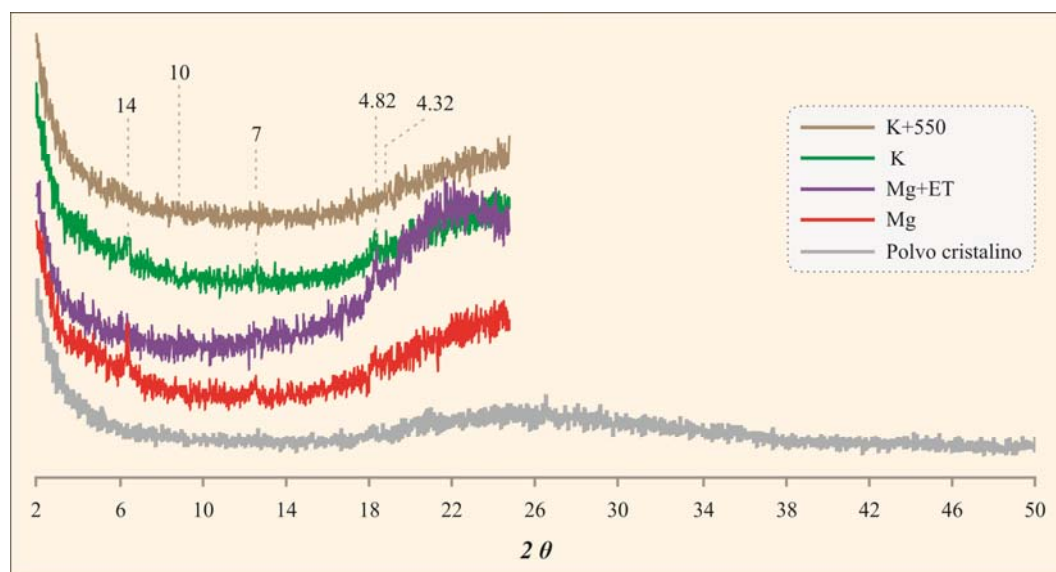


Fig. 30.- Difractogramas de RX correspondientes al horizonte A del perfil de Fonte de Pena Cabaleira perteneciente al Macizo Gabroico de Monte Castelo.

Tabla 24.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Fonte de Pena Cabaleira. Los especiados se expresan en Å.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
<b>Vermiculita</b>	14	14	14	Banda a 10	14
<b>Caolinita</b>	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
<b>Gibbsita</b>	4,82-4,32	4,82-4,32	4,82-4,32	amorfo	4,82-4,32
<b>Goethita</b>	4,11	4,11	4,11	amorfo	4,11/2,69

MINERALOGIA DE LOS PERFILES DESARROLLADOS A PARTIR DE ESQUISTOS

1.- Perfil de Sendim da Serra

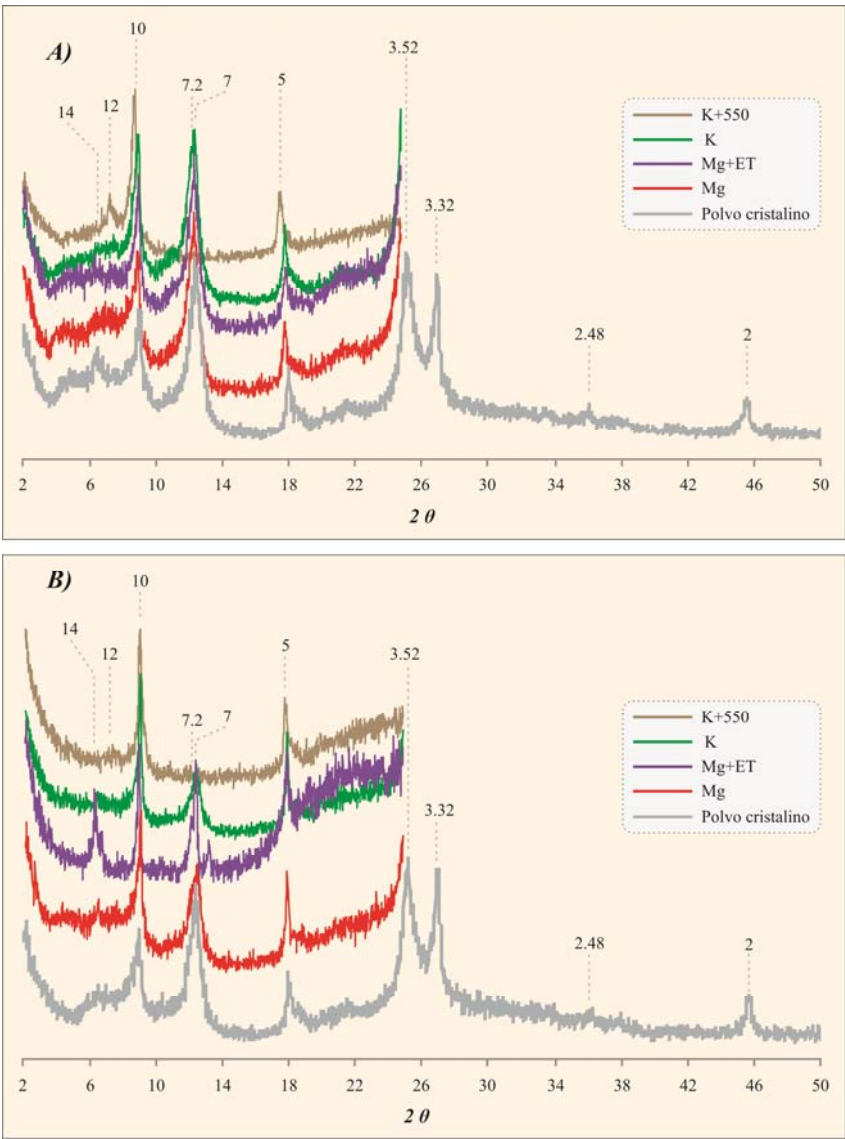


Fig. 31.- Difractogramas de RX correspondientes al perfil de Sendim da Serra incluido en la Formación Cuarcítica: A) horizonte A; B) horizonte B.

Tabla 25.- Composición mineralógica los horizontes del perfil de Sedim da Serra. Los especiados se expresan en Å. \*\* presente en ambos horizontes.

Mineral	Mg	Mg + ET	K	K + 550 °C	Polvo Cris.
Clorita-vermiculita**	14-7-4,72	14-7-4,72	14-7-4,72	12-4,72	14-4,72-2,84
Ilita**	10-5	10-5	10-5	10-5	10-5-2
Caolinita**	7,2	7,2	7,2	amorfo	7,2/3,52
Cuarzo**					3,32-2,48



## Chapter 4

---

*Expression of Andic Soils Properties  
in Soils from Galicia (NW Spain)  
under Forest and Agricultural Use.  
Field Study*

*This chapter has been published in:  
European Journal of Soil Science 56: 53 – 63  
(2005)*



# Chapter 4



Agricultural practices in Santiago's amphibolitic massif

## Expression of Andic Soil Properties in soils from Galicia (NW Spain) under forest and agricultural use. Field study.

---

### Summary

The organic matter (OM) of soils with andic properties has long been considered highly stable because of the presence of Al-humus complexes and sorption of organic ligands onto amorphous compounds. In this study, we characterized soils under different land use regimes located within an amphibolitic massif close to Santiago de Compostela (Spain), where soils with andic properties are present. Slash and burn agriculture was a common practice in the area until the second half of the 20th century. Thereafter, modern agriculture was progressively introduced into the area (AGR soils), and the rest of the land was either reforested or abandoned (FOR soils). We found that the mean organic C content of AGR soils ( $48.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) was ~50% that of FOR soils ( $94.2 \text{ g kg}^{-1}$ ). Mean soil pH was significantly greater ( $P < 0.05$ ) in the AGR than in FOR soils (4.95 compared with 4.63), which is attributed to liming and Ca-phosphate fertilization of the former. Mean concentrations of the Al forms studied (extractable with  $\text{CuCl}_2$ , sodium pyrophosphate, ammonium oxalate, or NaOH) were significantly smaller ( $P < 0.01$ ) in AGR (1.4, 4.9, 9.3,  $11.0 \text{ g kg}^{-1}$ , respectively) than in FOR soils (3.9, 10.2, 16.5,  $17.9 \text{ g kg}^{-1}$ , respectively). The results show the vulnerability of the OM and Al-humus complexes in these soils to modern AGR practices, which has led to the attenuation - and in some cases even the disappearance - of andic soil properties in a relatively short time (<30 years) following changes in land use/management. We propose the inclusion of the formative element 'andic' in the criteria for the definition of Umbrisol subunits; this would avoid the abrupt discontinuity observed in the current World Reference Base classification.





## 1. Introduction

The mineral fraction of soils has a strong influence on the characteristics and amounts of OM that they contain. The high stability of OM in Andisols is mainly attributed to the predominance of stable organo-mineral complexes formed between Al and humified organic components, and also to the sorption of organic ligands onto short-range ordered compounds, abundant in these soils (Martin & Haider, 1986; Aran *et al.*, 2001). Metal-humus complexes are believed to form primarily by the interaction of metals with carboxylic functional groups, which predominantly takes place at pH values less than 4.9-5.0. Above pH 5, the aqueous concentrations of Al are reduced by the decreased solubility of Al, and the OH<sup>-</sup> ions compete with organic ligands for Al (Dahlgren *et al.*, 1993). Short-range ordered compounds, such as polymerized Al, ferrihydrite, allophane, and imogolite, which have small particle sizes and large specific surface areas, can bind to organic compounds through electrostatic attraction, H-bonds, and ligand exchange reactions, thus stabilizing OM in these soils (Zech *et al.*, 1997). Moreover, in addition to chemical binding, the protection of OM from microbial decomposition is related to its insolubility and to trapping of the organic compounds by short-range ordered compounds (Boudot *et al.*, 1989; Zech *et al.*, 1997) and to the particular microstructure that these compounds confer to these soils (Buurman, *et al.*, 2007). All of this explains the higher mean residence time of organic C in Andisols than in other types of soils.

Andisols are therefore less susceptible than others to the effects of cropping. Parfitt *et al.* (1997) observed that the decrease in OM content that followed a change in land use from perennial pasture to cropping, was much less for the Andisol than for the Inceptisol under study, although long-term decreases in both organic C (OC) content and Al-humus complexes were also observed in the former soil. Thus, cropping has often led to attenuation of the andic properties displayed by these soils. In the present study, we characterized soils from four areas located on a homogenous amphibolitic massif in the proximity of Santiago de Compostela (Galicia, Spain), where *alu-andic Andosols* and *andic soils* are abundant. Little cultivation took place in these areas until the second half of the 20th century because of the low fertility of the soil, the heavy texture of subsurface horizons, and the undulating topography. Traditionally, land use was limited to the exploitation of shrubs, such as gorse, *Ulex europaeus* L., which was either growing wild or sown. The cut branches were used as animal bedding, and mixed with manure, which was then applied as fertilizer in cultivated soils close to the farms. Once the land was cleared of shrubs (by cutting and burning) it was then used for cereal cropping, generally rye, for short periods (5-10 years). Thereafter, the land was abandoned and naturally occurring vegetation left to grow for long periods (>20-30 years) to allow soil fertility to regenerate. This agricultural method (slash and burn agriculture) had hardly any effect on the soil, as tillage - carried out with the Roman (wooden) plough - was very shallow (<30 cm depth) and fertilization consisted only of the addition of the ashes from the burning of the shrub cover. After the second half of the 20th century, however, modern agriculture, with continuous cropping, intensive tillage and fertilization, was progressively introduced in the area (AGR soils) and the rest of the land was either reforested or abandoned (FOR soils), and naturally occurring vegetation left to grow. At present, arable rotations in AGR soils alternate between forage (ryegrass and white clover) and agricultural (maize and wheat) crops, the most common

rotation being a forage crop in winter and maize in summer. The progressive changes in land use and management produced in this area provide us with the opportunity to investigate how these changes and the length of time since they were produced have affected soil properties.

## 2. Material and Methods

The socio-agricultural system in Galicia is built around small villages called ‘aldeas’. The four areas chosen for study were each located near an ‘aldea’ (Gamas, Ardillero, Cubelo, Arins) and within each area, FOR and AGR soils were sampled (Table 1). Sites within each area were all less than 1.9 km apart, and the areas were all less than 4.3 km apart. The mean annual air temperature in the area is 12.3°C and the total mean annual precipitation is 1624 mm yr<sup>-1</sup>. There is a gradient of historical anthropogenic influence among aldeas; the gradient from more to less human influence being in the order Arins>Cubelo>Ardillero>Gamas. Types of vegetation in different years (1956, 1994, and 1997), as identified by aerial photographs, and at the time of sampling (summer 1999), are indicated in Table 1. The approximate decade in which transformation to modern AGR systems was carried out was estimated from interviews with local farmers and by aerial photographs, and is also indicated in Table 1.

Soil samples were taken from 0-20 cm depth, air-dried and passed through a 2 mm aperture sieve prior to analysis. Soil pH was measured in H<sub>2</sub>O and in 0.1 M KCl (soil:solution, 1:2.5). Total C, H, and N contents were determined using a LECO carbon analyzer (Model CHNS-932, LECO Corp., St. Joseph, MI), and total O using a EA elemental analyzer (Fisons EA-1108-CHNS-O, Fisons Instruments, Milano, Italy). Separate acid ammonium oxalate (Blakemore, 1978) and sodium pyrophosphate (Bascomb, 1968) extractable Fe (Fe<sub>o</sub> and Fe<sub>p</sub>, respectively) and Al (Al<sub>o</sub>, Al<sub>p</sub>) were measured for each sample. Aluminum was also extracted with 0.5 M NaOH (Al<sub>n</sub>) (Borggaard, 1985), and with 0.5 M CuCl<sub>2</sub> (Al<sub>Cu</sub>) (Juo & Kamprath, 1979). Silicon was determined in both the oxalate and the NaOH extracts (Si<sub>o</sub>, Si<sub>n</sub>). Aluminium, Fe, and Si were determined by atomic absorption spectrophotometry (Perkin Elmer 2380, Norwalk, CT). Carbon in the sodium pyrophosphate extract (C<sub>p</sub>) was determined using a TOC-5000 analyzer (Shimadzu Corp., Tokyo, Japan). The Bracewell test (Bracewell *et al.*, 1970) was carried out so that reactive Al surfaces could be quantified. A 1 M NaF solution was added to the soil (0.005:1, soil:solution ratio) and stirred for 25 minutes. The OH<sup>-</sup> released was monitored by continuous titration with HCl so that the pH was maintained constant at 6.8. The percentage of phosphate sorption was determined following the methodology used by Blakemore *et al.* (1981). All extractions and analyses were performed in duplicate.

The clay fraction was collected after treating the soil samples with 6% (v/v) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> followed by repeated shaking and sedimentation. The mineralogy of the clay fraction was determined by XRD using CuK $\alpha$  radiation with a Philips PM8203 diffractometer (Philips, Wavre, Belgium). Clay samples were saturated with K (then heated to 110, 330, and 550°C) and Mg (untreated and solvated with ethylene glycol, then heated to 550°C). Thermal analyses of the clay fraction were carried out using a DTA 1700 apparatus (Perkin-Elmer, Norwalk,

CT). The Fourier transform infrared (FTIR) spectra of untreated soil samples were obtained using a Bruker IFS-66V spectrometer (Bruker Daltonik GmbH, Karlsruhe, Germany).

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. – Some chemical properties of the AGR and the FOR soils

Mean values of OC content of AGR soils were 52% (w/w basis) and 63% (v/v basis) of those of the FOR soils (Table 2). This shows the vulnerability of these soils to modern agricultural practices, in spite of the well-known high stability of their OM. There were significant differences ( $P < 0.01$ ) in the mean molar C:H and C:O ratios of the AGR and the FOR soils, with both ratios always being higher in the latter (Table 2). Moreover, both mole ratios were positively related to OC content ( $R^2 = 0.73$  and  $0.93$  for C:O and C:H, respectively) (Figure 1). However, as the samples also included the mineral fraction, these variations cannot be exclusively attributed to changes in OM characteristics. The mean gravimetric C:N ratio was significantly less ( $P < 0.05$ ) in the AGR than in the FOR soils (Table 2), possibly because of the addition of N fertilizers to cropped soils, and a greater presence of non-humified organic debris under the forest canopy. The  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  was significantly greater

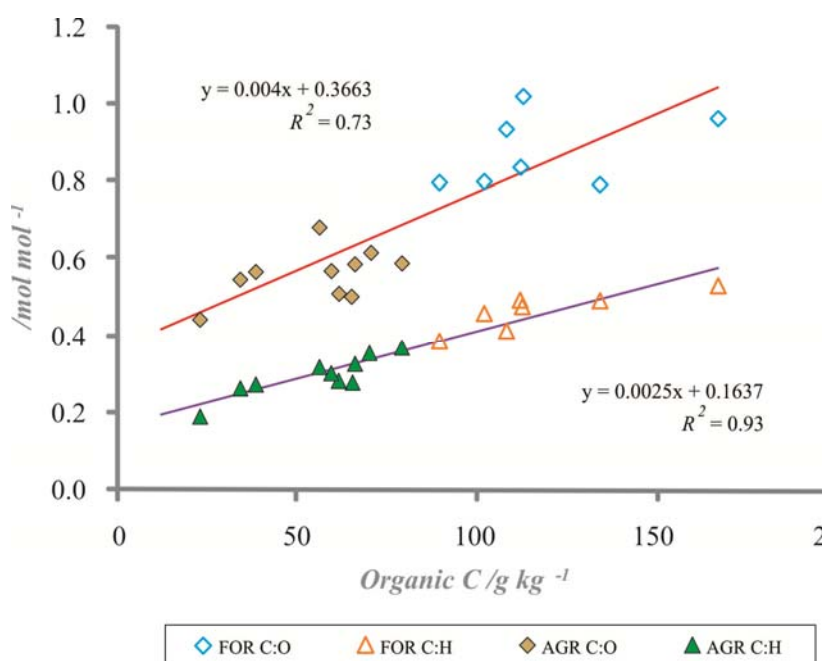
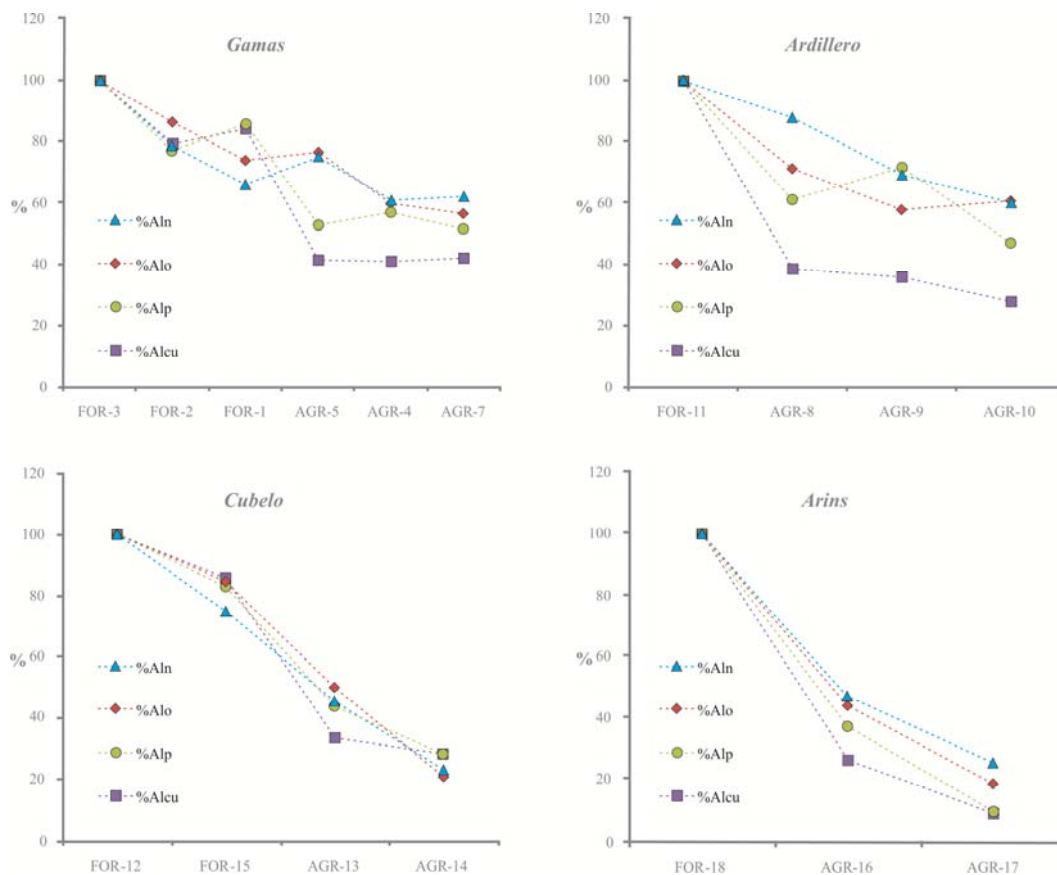


Figure 1. Mole ratios (see legend) of the soils studied plotted against organic C content.

( $P < 0.05$ ) in the AGR soils than in the FOR soils (means: 4.95 compared with 4.63), which was attributed to the addition of lime and Ca-phosphate to the former, although pH values of all the soils studied were small (Table 2). The large buffering capacity of these soils (Camps Arbustain & Macías, 2000) may explain the small changes in pH, in spite of continuous addition of lime and Ca-phosphate by the farmers. Moreover, other AGR practices, such as the addition of ammonium fertilizers (manures), may have had the opposite effect on soil pH.

There were significantly ( $P < 0.01$ ) smaller amounts of all of the Al forms studied ( $Al_{Cu}$ ,  $Al_p$ ,  $Al_o$ ,  $Al_n$ ), in the AGR than in the FOR soils studied (Table 2). The aluminium extractable with  $CuCl_2$  was the most labile Al fraction, and the  $Al_{Cu}$  values of the AGR soils were less than 40% of the corresponding values in the FOR soils (Figure 2). The other Al forms studied ( $Al_p$ ,  $Al_o$ ,  $Al_n$ ), also decreased with the AGR conversion, although to a lesser extent (Figure 2). Mean values of  $Al_p$ - $Al_{Cu}$ , which provide an estimate of the amounts of Al-humus complexes of high stability (although perhaps also including polymerized Al), were significantly smaller ( $P < 0.01$ ) in the AGR (mean:  $3.47 \text{ g kg}^{-1}$ ) than in the FOR soils (mean:  $6.32 \text{ g kg}^{-1}$ ). In contrast, mean values of  $Al_o$ - $Al_p$ , which provide an estimation of the amount of inorganic amorphous Al compounds, were not significantly different ( $P < 0.05$ ) when comparing these two groups of soils (means: 4.44 and  $6.26 \text{ g kg}^{-1}$ , for AGR



**Figure 2.**  $Al_n$ ,  $Al_o$ ,  $Al_p$ , and  $Al_{Cu}$  of the different soils samples grouped per “aldea” (Gamas, Ardillero, Cubelo and Arins), expressed as per cent in relation to the site of each transect with the maximum values (FOR-3 in Gamas, FOR-11 in Ardillero, FOR-12 in Cubelo, and FOR-18 in Arins).

Table 1. Site coordinates and history of land-use regime in time.

Area	S.I.*	Altitude /m	UTM Coordinates	Land use			Decade of transformation <sup>a</sup>
				1956	1994	1997	
Gamias	3-go	294	29T 542134 4744014	Slash and burn AGR <sup>b</sup>	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )
	2-go	345	29T 542314 4744572	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )
	1-go	346	29T 543271 4744472	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )
	5-m	286	29T 542905 4743847	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation (maize)
	4-gr	287	29T 542915 4743856	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Arable rotation (forage)
	7-w	319	29T 543202 4743817	Slash and burn AGR	Eucalyptus forest	Eucalyptus forest	Arable rotation (wheat)
							1990s
Ardillero	11-ch	245	29T 545052 4742030	Slash and burn AGR	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	1970s
	8-gr	276	29T 545711 4742241	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (forage)
	9-gr	250	29T 545564 4742590	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (forage)
	10-m	230	29T 545391 4742905	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (maize)
Cubelo	12-pi	322	29T 544620 4745893	Slash and burn AGR	Pine forest	Pine forest	1970s
	15-ok	294	29T 544844 4745332	Slash and burn AGR	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	1960s
	13-m	296	29T 544799 4745495	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (maize)
	14-gr	270	29T 544768 4744828	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (forage)
Arins	18-ch	318	29T 542191 4745291	Arable rotation	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	1960s
	16-m	210	29T 540561 4745853	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation	1950s
	17-gr	196	29T 541089 4745614	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation	1950s

<sup>a</sup> Approximate decade of transformation from either traditional AGR (slash and burn AGR) or FOR land use to modern AGR land use, identified by aerial photographs and interviews with local farmers.

<sup>b</sup> Slash and burn AGR consisted of the harvesting of shrubs (*Ulex europaeus* L.), which were burned, and the ashes then spread on the land. The land was then used for cereal cropping, generally rye, for short periods (5-10 years). Thereafter, the land was abandoned and naturally occurring vegetation left to grow for long periods (>20-30 years) so that soil fertility could recuperate.

\* S.I.: Site Identification.



and FOR soils, respectively). There were no significant differences ( $P < 0.05$ ) between the mean values of  $Al_n-Al_o$  in the two types of soils (considered as an estimate of inorganic Al compounds of different degrees of crystallinity) ( $1.64$  and  $1.44 \text{ g kg}^{-1}$ , for AGR and FOR soils, respectively). These results therefore indicate that the organically-complexed forms of Al were the main form of Al affected by modern AGR practices.

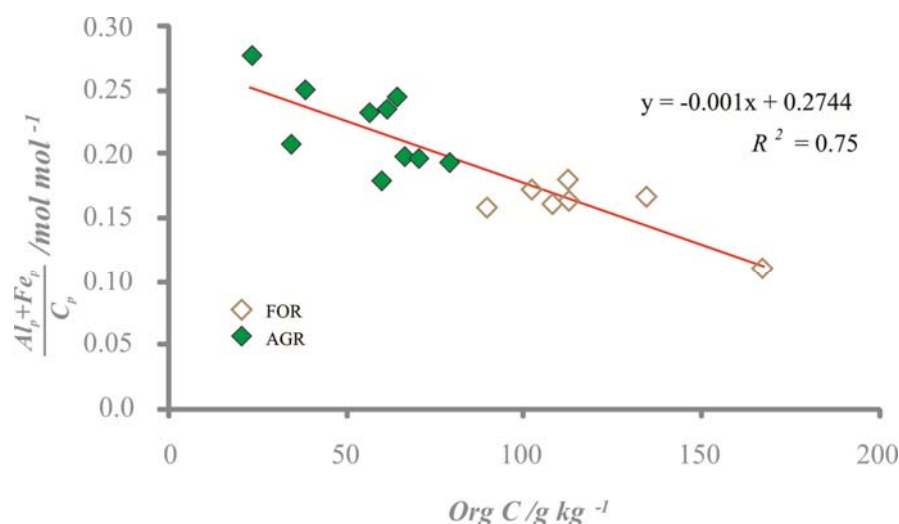


Figure 3.  $(Al_p+Fe_p)/C_p$  mole ratio plotter against organic C content.

There was a significant decrease ( $P < 0.01$ ) in humified OC - as estimated by pyrophosphate extraction ( $C_p$ ) - in relation to cropping (means:  $14.0$  and  $34.3 \text{ g kg}^{-1}$ , for AGR and FOR soils, respectively) (Table 2), whereas the inverse occurred ( $P < 0.01$ ) with the  $(Al_p+Fe_p)/C_p$  mole ratio (means:  $0.22$  and  $0.16 \text{ mol mol}^{-1}$ , for AGR and FOR soils, respectively) (Table 2). Moreover, the latter ratio was negatively related ( $R^2 = 0.75$ ) to OC content (Figure 3). On the basis of the amounts of functional groups of humic substances, the maximum capacity of the OM to complex metals is indicated by a metal/C mole ratio (in the pyrophosphate extract) of between  $0.1$  and  $0.2$  (Higashi *et al.*, 1981; Higashi, 1983; Dahlgren *et al.*, 1993), although the critical ratio is pH-dependent (Buurman, 1985). The higher  $(Al_p+Fe_p)/C_p$  mole ratio in AGR soils than in FOR soils may be explained by the low specificity of the sodium pyrophosphate extraction, as it may extract some interlayer-Al and coatings of polymerized Al (Kaiser & Zech, 1996), which may be more abundant in the AGR soils because of the slightly greater pH values.

The values of  $Al_o+1/2Fe_o$ , a criterion used for defining andic soil properties, were significantly smaller ( $P < 0.05$ ) in the AGR soils than in the FOR soils (means:  $1.39$  and  $1.97 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ , respectively) (Table 3), and a decreasing trend in this index was observed in the order Gamas > Ardillero > Cubelo > Arins (Table 3) - particularly in the AGR soils (means:  $1.89$ ,  $1.61$ ,  $1.01$ , and  $0.70 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ). This is consistent with the longer amount of time since their conversion to modern AGR use. The decrease in the index was caused primarily

Table 2. Properties of the soils studied (for explanation of abbreviations see text).

Area	Site identifier	Org C /g kg <sup>-1</sup>	Org C /t ha <sup>-1</sup> <sup>a</sup>	C <sub>p</sub> /g kg <sup>-1</sup>	C:O /mol mol <sup>-1</sup>	C:H /mol mol <sup>-1</sup>	C:N /g g <sup>-1</sup>	pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>KCl</sub>	Al <sub>Cu</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>o</sub>	Al <sub>n</sub> /g kg <sup>-1</sup>	Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	(Al <sub>p</sub> +Fe <sub>p</sub> )/C <sub>p</sub> /mol mol <sup>-1</sup>
Gamas	FOR-3	134.4	223	39.0	0.79	0.49	11.1	5.02	4.57	4.57	12.8	21.2	24.4	3.8	6.7	52.5	0.17
	FOR-2	112.3	159	27.9	0.84	0.49	8.5	5.16	4.67	3.63	9.9	18.3	19.0	3.0	6.0	41.3	0.18
	FOR-1	102.1	180	33.7	0.80	0.46	11.3	4.76	4.32	3.85	11.0	15.6	16.0	4.3	5.5	52.5	0.17
	AGR-5	79.4	118	20.5	0.59	0.36	8.1	5.01	4.65	1.89	6.7	16.2	18.3	4.6	15.2	68.8	0.19
	AGR-4	64.8	96	17.5	0.51	0.29	9.2	4.99	4.47	1.87	7.3	12.7	14.7	4.9	9.8	56.3	0.25
	AGR-7	62.0	108	15.1	0.51	0.29	8.9	4.74	4.35	1.92	6.5	11.9	15.0	3.0	6.9	70.0	0.24
Ardillero	FOR-11	167.4	264	44.8	0.96	0.53	12.6	4.59	4.18	4.94	9.4	18.1	18.4	3.5	7.5	45.0	0.11
	AGR-8	59.9	150	17.1	0.57	0.30	9.7	5.16	4.48	1.90	5.7	12.9	16.1	2.5	7.8	52.5	0.18
	AGR-9	66.4	177	19.7	0.59	0.33	10.0	4.81	4.47	1.77	6.7	10.4	12.7	4.3	7.5	58.8	0.20
	AGR-10	70.4	153	15.0	0.62	0.36	7.8	5.37	5.12	1.37	4.4	11.0	11.1	4.7	13.0	61.3	0.20
Cubelo	FOR-12	113.0	138	34.7	1.02	0.47	10.7	4.80	4.45	3.72	11.3	17.6	21.1	3.2	6.2	56.3	0.16
	FOR-15	108.3	173	31.3	0.94	0.41	9.0	4.01	4.10	3.18	9.3	14.7	15.8	4.3	7.0	65.0	0.16
	AGR-13	56.6	117	13.6	0.68	0.32	8.9	5.00	4.52	1.24	4.9	8.7	9.6	4.6	8.8	38.1	0.23
	AGR-14	34.7	65	10.8	0.55	0.26	9.9	4.28	3.90	1.04	3.1	3.5	4.7	4.0	7.3	26.3	0.21
Arins	FOR-18	89.6	129	28.7	0.80	0.39	8.8	4.09	4.04	3.31	7.8	9.9	10.8	4.8	6.5	51.3	0.16
	AGR-16	39.0	101	8.0	0.57	0.27	8.1	4.93	4.50	0.87	2.9	4.3	5.0	3.3	7.8	41.3	0.25
	AGR-17	23.6	58	3.2	0.45	0.19	7.9	5.16	4.71	0.30	0.8	1.8	2.7	2.5	8.0	38.8	0.28
Mean FOR soils (n=7)		94.2	181	34.3	0.88	0.46	10.3	4.63	4.33	3.89	10.2	16.5	17.9	3.8	7.2	52.0	0.16
Mean AGR soils (n=10)		48.7	114	14.0	0.56	0.30	8.8	4.95	4.52	1.42	4.9	9.3	11.0	3.8	8.9	51.7	0.22
Signif. level		** <sup>b</sup>	**	**	**	**	* <sup>b</sup>	*	n.s. <sup>c</sup>	**	**	**	**	n.s.	*	n.s.	**

<sup>a</sup> For 0-20 cm depth.<sup>b</sup> \*, \*\* Difference between FOR and AGR mean significant at  $P < 0.05$  and  $< 0.01$ , respectively.<sup>c</sup> n.s. Difference between FOR and AGR mean not significant at  $P < 0.05$ .

by a decrease in the organically-complexed Al, as discussed above. In contrast, the mean value of  $\text{Fe}_o$  in the AGR soils was significantly greater ( $P < 0.05$ ) than in the FOR soils (Table 2), due to an increase in the inorganic amorphous Fe forms ( $\text{Fe}_o\text{-Fe}_p$ ). The increase in both pH and Eh caused by AGR practices may have induced greater precipitation of amorphous Fe compounds, possibly in the form of ferrihydrite.

The destruction of Al-humus complexes through modern AGR practices can be attributed to different processes. Application of lime and Ca-phosphate, commonly used on soils with andic properties, causes a local increase in pH, which enhances the formation of amorphous Al-OH precipitates. These precipitates can react with negatively charged organic compounds (Carballas *et al.*, 1979). This would explain the observed increase in the  $\text{Al}_p/\text{C}_p$  mole ratio with AGR use. On the other hand, the application of  $\text{NH}_4^+$ -containing fertilizers can give rise to a local release of  $\text{H}^+$  through nitrification, and dissolve the more labile organo-Al compounds, thereby releasing OC into solution, which becomes susceptible to leaching or microbial degradation. Furthermore, the lack of vegetation cover during part of the year in cropped fields causes greater temperature fluctuations than in FOR systems, and desiccation is more frequent. On drying, OM is likely to condense, and break weak bonds between it and hydroxy-Al (Haynes & Swift, 1989). Finally, the well-known destructive effect of tillage on soil aggregates causes the disaggregation of Al-humus complexes and increases accessibility to OM (Dalal, 2001).

### 3.2. – Soil mineralogy of the AGR and the FOR soils

The Fourier transformed infrared spectra of untreated soil samples showed more intense bands at 3696, 3620, 1031, 913, 538, and 470  $\text{cm}^{-1}$  in the AGR soils than in the FOR soils, which indicates the presence of kandite minerals (kaolinite, halloysite) (Figure 4). The intensity of the bands at 1632 and at 1384  $\text{cm}^{-1}$  was less in the AGR than in the FOR soils, which indicates a smaller presence of deprotonated and metal complexed carboxyl groups in the former (Gu *et al.*, 1994; Kaiser *et al.*, 1997). The mineralogical characterization of the clay fraction by DTA indicated the presence of an endotherm between 450 and 590°C (Figure 5) - associated with heat-induced transformations in the kandite structure – in the AGR soils, but not in the FOR soils. Moreover, XRD analyses also confirmed the presence of kandites (Table 4), possibly a mixture of kaolinite and halloysite, often accompanied by small amounts of hydroxy-Al interlayered vermiculites, in the AGR soils, whereas usually no peaks were observed in the FOR soils (Table 4). The only FOR soils in which some crystallinity could be detected were FOR-15 and FOR-18, in which the anthropogenic influence has probably been greater than in the other FOR soils.

Halloysite is more common in those soils with andic properties located in areas where precipitation is less than 1700 mm (Parfitt *et al.*, 1983), and with a pronounced dry season (Takahashi *et al.*, 1993). During the dry period, the soil solution becomes concentrated allowing the crystallization and resilication of amorphous aluminosilicates (Dahlgren *et al.*, 1993; Takahashi *et al.*, 1993). The former authors indicated that the primary factor regulating the preferential formation of halloysite over amorphous compounds is the concentration of soluble Si. Moreover, length of time of weathering is also important, and the weathering sequence from amorphous compounds to halloysite is generally accepted (Fieldes, 1955; Fieldes & Claridge, 1975). The higher

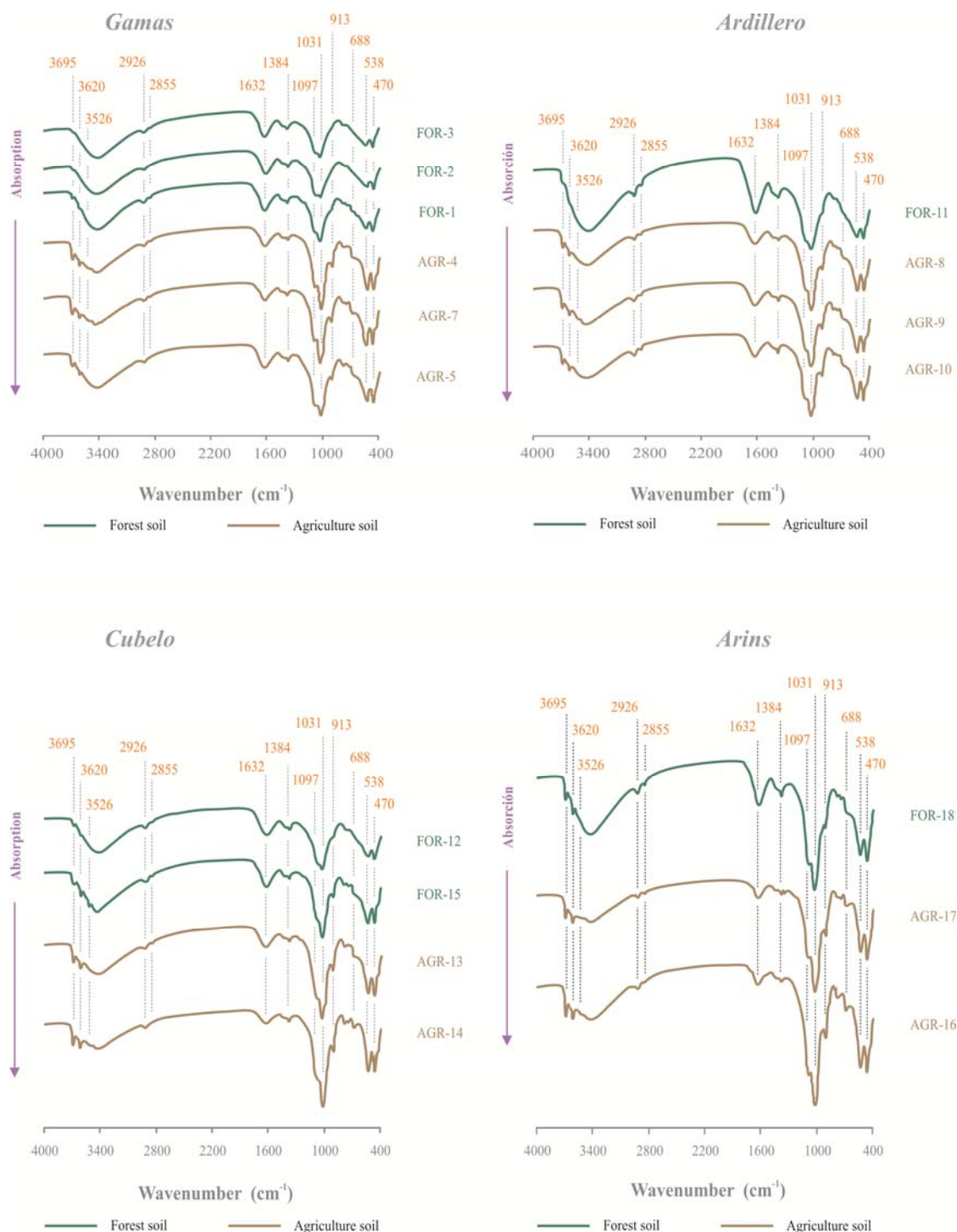
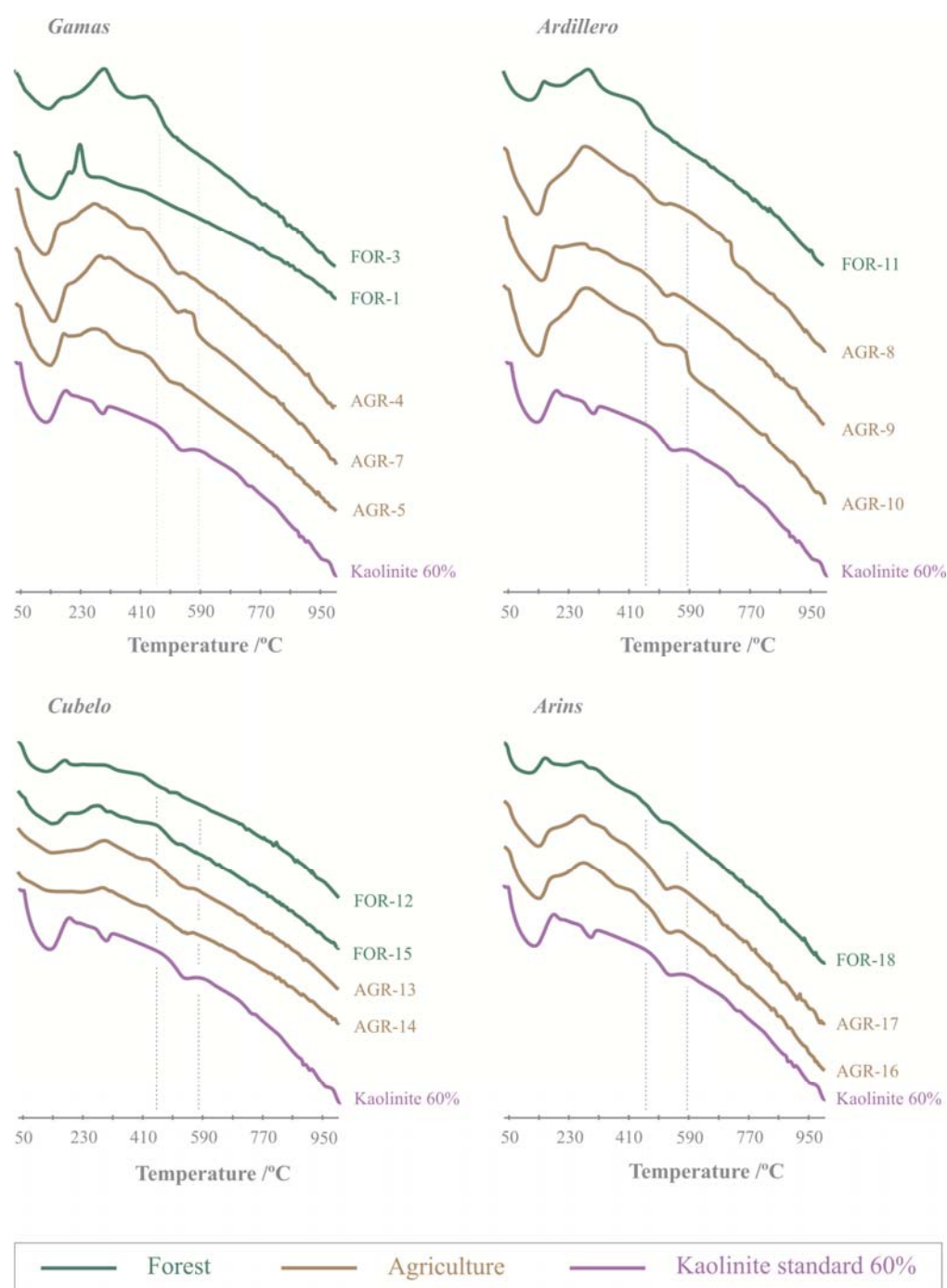


Figure 4. FTIR spectra of untreated soils samples grouped per “aldea” (Gamas, Ardillero, Cubelo, and Arins).

soil temperature and water content fluctuation of AGR soils, along with the lack of vegetation cover during part of the year, possibly caused more frequent desiccation processes, inducing the formation of crystalline minerals. However, other soil processes induced by cropping, such as the decrease in OM content and the destruction of Al-humus complexes, may also favour crystallization processes. Moreover, the use of a deeper plough may have caused incorporation of kandites from subsurface B horizons. Nonetheless, more studies are needed to discern

which of the AGR practices have had a greater influence on the changes in soil properties discussed above. Finally, the XRD, IR, and DTA diagrams of FOR soils do not allow the identification of any crystalline compound at the soil depth studied (0-20 cm), and their patterns are typical of soils in which short-range ordered compounds predominate. These diagrams are, therefore consistent with the  $Al_o$ ,  $Al_p$ , and  $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$  values of these soils (Tables 2 and 3).



**Figure 5.** DTA curves of the clay fractions of the soils samples grouped per "aldea" (Gamas, Ardillero, Cubelo, and Arins). There was not enough clay for analysis of sample FOR-2 of the Gamas transect.



Table 3 Criteria for andic soil properties in the soils under study and their soil classification.

Area	Decade of transformation	Site identifier	Bulk density		Phosphate sorption		Al <sub>o</sub> +1/2Fe <sub>o</sub> /g 100 g <sup>-1</sup>	NaF- reactivity /meq OH <sup>-</sup> kg <sup>-1</sup>	Classification	
			/g cm <sup>-3</sup>	%	WRB (1998)	Soil Survey Staff (1999)				
Gamas		FOR-3	0.83	95	Non-cultivated soils			4480	Dystri-fulvic Andosol	Typic Fulvudand
		FOR-2	0.71	99	2.45	2.13	4032	Dystri-fulvic Andosol	Typic Fulvudand	
		FOR-1	0.88	86	1.84	3328	Ferrali-humic Umbrisol	Andic Dystrudept		
Ardillero		FOR-11	0.79	94	2.19	3968	Pachi-dystri-fulvic Andosol	Pachic Fulvudand		
Cubelo		FOR-12	0.61	87	2.07	4224	Dystri-fulvic Andosol	Typic Fulvudand		
		FOR-15	0.80	85	1.82	3008	Ferrali-humic Umbrisol	Andic Dystrudept		
Reforestation of previously cultivated soils <sup>a</sup>										
Arins	1970	FOR-18	0.72	66	1.31	2688	Ferrali-humic Umbrisol	Andic Dystrudept		
Cultivated soils <sup>b</sup>										
Gamas	1990	AGR-5	0.74	85	2.38	4166	Dystri-fulvic Andosol	Typic Fulvudand		
	1990	AGR-4	0.74	83	1.76	3520	Ferrali-humic Umbrisol	Andic Dystrudept		
	1990	AGR-7	0.87	74	1.54	3200	Ferrali-humic Umbrisol	Andic Dystrudept		
Ardillero	1970	AGR-8	1.25	70	1.68	3712	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
	1970	AGR-9	1.33	62	1.41	3072	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
	1970	AGR-10	1.09	68	1.74	3264	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
Cubelo	1960	AGR-13	1.03	53	1.31	3072	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
	1960	AGR-14	0.94	30	0.72	1984	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
Arins	1950	AGR-16	1.29	33	0.82	2432	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		
	1950	AGR-17	1.23	29	0.59	2166	Ferrali-humic Umbrisol	Oxic Dystrudept		

<sup>a</sup>Transformation from modern AGR land use to mixed deciduous forest dominated by *Castanea sativa* Mill.<sup>b</sup>Transformation from either traditional AGR (slash and burn AGR) or FOR land use to modern AGR land use.



### 3.3. – Soil use and changes in andic soil properties and soil classification

Soils developed from basic and easily weatherable materials (e.g. gabbros, amphibolites, granulites, and some biotitic schists and basic gneisses) under humid temperate conditions, such as those found in Galicia, often display andic soil properties during the early stages of weathering, associated with the presence of large contents of Al-humus complexes and other Al-reactive forms (Macías *et al.*, 1978; García-Rodeja *et al.*, 1987). The results obtained in this study indicate that the degree of expression of the andic soil properties allows the inclusion in both the Andisol order (Soil Survey Staff, 1999) and the Andosol reference soil group (WRB, 1998), of only those soils which have never (FOR-2, FOR-3, FOR-11, and FOR-12) or just recently (AGR-5) been subjected to modern AGR techniques. The surface horizons of these soils meet the criteria required for *andic* and *fulvic* diagnostic horizons, and for the definition of the formative element ‘*alu-andic*’ for the lower level unit of the WRB (1998), and also for the andic soil properties and criteria required for the inclusion in the Andisol order (Soil Survey Staff, 1999), as indicated in Table 3. These properties are small bulk density, large phosphate and fluoride retention capacity (the latter being manifested by the Bracewell test), great OC accumulation, large  $C_p$ , large  $Al_o$  and  $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$  values, and the mineralogy of the clay fraction being made up exclusively of amorphous or short-range ordered compounds.

Table 4 Mineralogy of the soils studied (<2  $\mu$ m fraction) as identified by XRD.

Area	Site identifier	Layer silicates
Gamas	FOR-3	Not detectable
	FOR-2	Not detectable
	FOR-1	Not detectable
	AGR-5	Kandite (M) <sup>a</sup>
	AGR-4	Hydroxy-Al interlayered vermiculite (m) <sup>a</sup> , kandite (M)
	AGR-7	Kandite (M)
Ardillero	FOR-11	Not detectable
	AGR-8	Kandite (M)
	AGR-9	Hydroxy-Al interlayered vermiculite (M), kandite (M)
	AGR-10	Kandite (M)
Cubelo	FOR-12	Not detectable
	FOR-15	Kandite (m)
	AGR-13	Kandite (m)
	AGR-14	Mica (M), hydroxy-Al interlayered vermiculite (m), kandite (M)
Arins	FOR-18	Hydroxy-Al interlayered vermiculite (m), kandite (M)
	AGR-16	Hydroxy-Al interlayered vermiculite (m), kandite (M)
	AGR-17	Hydroxy-Al interlayered vermiculite (m), kandite (M)

<sup>a</sup> (M) and (m) refer to the size of the peaks detected (major and minor, respectively).

Some FOR soils (FOR-1, FOR-12, FOR-15, and FOR-18) do not meet the criteria for Andosols or Andisols, because they are either not deep enough (FOR-12) or their  $Al_o + 1/2Fe_o$  values are below  $2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$  (Table 3); however, they do meet the criteria of the andic subgroups of Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), being classified as *Andic Dystrudepts*. It should be noted that the small  $Al_o + 1/2Fe_o$  value of FOR-18 soil is probably due to the fact that the area where this field is located had suffered the earliest anthropogenic influence of the soils studied (by 1950), and the land was already subject to the intensive AGR system by the year 1956, thereafter being reforested with chestnut trees. The AGR soils in which modern AGR techniques were introduced earliest (Arins and Cubelo) are classified as *Oxic Dystrudepts*, whereas those AGR soils in which these techniques were introduced last (Gamas and Ardillero) meet the criteria for *Andic Dystrudepts*, and in one case, for Andisol (Soil Survey Staff, 1999) (Table 3). In contrast, when using the classification system of the WRB (1998), only the soil that has recently been converted to intensive AGR use (AGR-5) maintains an andic character whereas the remaining AGR soils are classified as Umbrisols (Table 3).

From these results it can be inferred that the Soil Taxonomy system allows a better follow-up of the changes produced in the properties of these soils than the WRB system (1998), with the inclusion of an ‘andic’ suborder for those soils in which the  $Al_o + 1/2Fe_o$  values are between 1 and  $2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ . However, when using the WRB system (1998) there is an abrupt discontinuity in the classification sequence. For this reason, we propose the modification of the formative element ‘andic’ for the lower level units, and its inclusion as one of the criteria for the definition of Umbrisol subunits in the WRB system. The criterion would be less strict than the definition of *andic horizon*, and could follow the same requirement as that of Soil Taxonomy ( $1 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1} < Al_o + 1/2Fe_o < 2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ).

## 4. Conclusions

We found important changes in the properties of the surface horizons of andic soils following their conversion from shrub-forest systems with short periods of low-intensity cultivation (slash and burn agriculture) to modern agriculture with highly-intensive cultivation and fertilization. The main change is a marked decrease in OM and Al-humus complexes (indicated by a decrease in the  $Al_p$  and  $Al_{Cu}$  values), which has led to the attenuation of, and in some cases, the disappearance of andic soil properties ( $Al_o + 1/2Fe_o$ , phosphate retention, reactivity to fluoride). Therefore, whereas FOR soils meet the criteria for either the definition of Andisols or Andosols or the andic subgroups of the *Dystrudepts*, the AGR soils show a progressive decrease in the degree of expression of the andic soil properties with time after conversion to modern AGR soil use. The Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) classification allows a better follow-up of these gradual changes than the WRB system (1998). For this reason, we propose the modification of the definition of the formative element ‘andic’, to a less strict usage; its inclusion in the criteria would allow the definition of subunits of the Umbrisols, soils which have a much greater affinity, in terms of soil properties, with Andisols, than others such as Phaeozems, in which these subunits have been included.

## 5. Acknowledgments

The author thanks the anonymous reviewers for their helpful suggestions on an earlier version of this manuscript.

## 6. References

- Aran, D., Gury, M., & Jeanroy, E. 2001. Organo-metallic complexes in an Andosol: a comparative study with a Cambisol and Podzol. *Geoderma*, **99**, 65-79.
- Bascomb, C.L. 1968. Distribution of pyrophosphate iron and organic carbon in soils of various groups. *Journal of Soil Science*, **19**, 251-256.
- Blakemore, L.C. 1978. Exchange complex dominated by amorphous material (ECDAM). In: *The Andisol Proposal*. (ed. G.D. Smith), pp. 21-22. Soil Bureau, Lower Hutt, New Zealand.
- Blakemore, L.C., Searle, P.L., & Daly, B.K. 1981. *Soil Bureau Laboratory Methods: A. Methods for Chemical Analysis of Soils*. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10a, Lower Hutt, New Zealand.
- Borggaard, O.K. 1985. Organic matter and silicon in relation to the crystallinity of soil iron oxides. *Acta Agriculturae Scandinavica*, **35**, 398-406.
- Boudot, J.P., Bel Hadj, B.A., Steiman, R., & Seigle-Murandi, F. 1989. Biodegradation of synthetic organo-metallic complexes of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios. *Soil Biology & Biochemistry*, **21**, 961-966.
- Bracewell, J.M., Campbell, A.S., & Mitchell, B.D. 1970. An assessment of some thermal and chemical techniques used in the study of the poorly-ordered aluminosilicates in soil clays. *Clay Minerals*, **8**, 325-335.
- Buurman, P. 1985. Carbon/sesquioxide ratios in organic complexes and the transition albic-spodic horizon. *Journal of Soil Science*, **36**, 255-260.
- Buurman, P., Peterse, F. & Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils – A pyrolysis-GC/MS study of Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science*, **58**, 1330-1347.
- Camps Arbestain, M. & Macías, F. 2000. Respuesta a la acidificación y adsorción de sulfatos en suelos ándicos y ferrálicos desarrollados a partir de anfíbolitas en Galicia (NW España). *Edafología*, **7**, 61-71.
- Carballas, M., Carballas, T., & Jaquin, F. 1979. Biodegradación y humificación de la materia orgánica en suelos húmíferos. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **39**, 1699-1717.
- Dahlgren, R., Shoji, S. & Nanzzyo, M. 1993. Ammonium-potassium and ammonium-calcium exchange equilibria in bulk and rhizosphere soil. In: *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties, and Utilization*. (eds S. Shoji, M. Nanzzyo, & R. Dahlgren), pp. 101-143. Elsevier, Amsterdam.

- Dalal, R.C. 2001. Acidic soil pH, aluminium and iron affect organic carbon turnover in soil. *Net Ecosystem Exchange Workshop Proceedings. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting*, pp. 111-115. Canberra, Australia.
- Fieldes, M. 1955. Clay mineralogy of New Zealand Soils. *New Zealand Journal of Science and Technology*, **B37**, 336-350.
- Fieldes, M. & Claridge, G.G.C. 1975. Allophane. In: *Soil Components*, Vol. 2. (ed. J.E. Gieseking), pp. 351-393. Springer Verlag, New York, NY.
- García-Rodeja, E., Silva, B., & Macías, F. 1987. Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *Journal of Soil Science*, **38**, 573-591.
- Gu, B., Schmitt, J., Chen, Z., Llang, L. & McCarthy, J.F. 1994. Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: Mechanisms and models. *Environmental Science and Technology*, **28**, 38-46.
- Haynes, R.J. & Swift, R.S. 1989. The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations. *Journal of Soil Science*, **40**, 773-781.
- Higashi, T. 1983. Characterization of Al/Fe-humus complexes in Dystrandepts through comparison with synthetic forms. *Geoderma*, **31**, 277-288.
- Higashi, T., De Coninck, F., & Gelaude, F. 1981. Characterization of some spodic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetraborate. *Geoderma*, **25**, 131-142.
- Juo, A.S.R. & Kamprath, E.J. 1979. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Science Society of America Journal*, **43**, 35-38.
- Kaiser, K., Guggenberger, G., Haumaier, L. & Zech, W. 1997. Dissolved organic matter sorption on subsoils and minerals studied by <sup>13</sup>C-NMR and DRIFT spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, **48**, 301-310.
- Kaiser, K. & Zech, W. 1996. Defects in estimation of aluminum in humus complexes of podzolic soils by pyrophosphate extraction. *Soil Science*, **161**, 452-458.
- Macías, F., Puga, M., & Guitián, F. 1978. Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología*, **37**, 187-203.
- Martin, J.P. & Haider, K. 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. In: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (eds P.M. Huang & M. Schnitzer), pp. 283-304. Soil Science Society of America, Special Publication 17. ASA, Madison, WI.

- Parfitt, R.L., Russell, M. & Orbell, G.E. 1983. Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite. *Geoderma*, **29**, 41-57.
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S. & Shepherd, T.G. 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, **75**, 1-12.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy, a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, 2nd edn. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Services. Agriculture Handbook No. 436. Superintendent of Documents, Government Printing Office, Washington, DC.
- Takahashi, T., Dahlgren, R. & van Susteren, P. 1993. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic materials in the xeric moisture regime of northern California. *Geoderma*, **59**, 131-150.
- WRB. 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report 84. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Zech, W., Senesi, N., Guggenberger, G., Kaiser, K., Lehmann, J., Miano, T.M., Miltner, A. & Schroth, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*, **79**, 117-161.





## Chapter 5

---

### *Influence of Agricultural Practices on the Stability of Organo-aluminic Complexes in an Alu-andic Andosol: A Laboratory Study.*

*This chapter is actually in press:  
Soil Science XX: XXX – XXX  
(2009)*



# Chapter 5



Experimental design

## Influence of agricultural practices on the stability of organo-aluminic complexes in an alu-andic Andosol: A laboratory study.

---

### Summary

A 16-wk long laboratory experiment was carried out with the aim of investigating the influence of agricultural practices on the stability of organo-aluminic complexes in andic soils. Soil samples from an A horizon (Typic Fulvudand) were placed in filtration funnels and subjected to the treatments: (i) liming (L), (ii) fertilization (F), and (iii) combination of L+F. The amendments were added at time 0 and at the start of week 8. All soils, except the control soil, were subjected to simulate tilling (T) once a week. A subset of samples from each treatment was also subjected weekly to heat treatment (H). All soils were watered 3 days each week. After 16 weeks a significant ( $P < 0.05$ ) degree of acidification was observed in those soils without chemical amendment (Ctrl, T and T+H) and in the fertilized soils ( $\text{pH} < 4.6$ ). This was accompanied by a flush of Al into solution. Heated soils suffered a large decrease in  $\text{LaCl}_3$ - and  $\text{CuCl}_2$ -extractable Al, especially in the soils with all treatments (T+F+L+H). This was paralleled by an increase in dissolved organic C and Al released into solution, and an increase in soil pH. Heating a wet soil might produce a similar effect to that of hot water addition as regards the extraction of labile soil organic matter. The wetting and drying cycling induced by the heat treatment followed by irrigation may have also promoted the effects observed. The findings showed how the loss of andic soil properties after land use change occur as a result of the combination of the different agricultural practices investigated, being the most important factors heat and moisture fluctuations.

**Key words:** Soil Organic Matter; organo-aluminic complexes; Andosols; agricultural practices; Andic soil properties.

---



## 1. Introduction

The high stability of soil organic matter (SOM) in Andosols is mainly attributed to the predominance of organo-mineral complexes and sorption of organic ligands onto short-range order compounds, such as allophane and imogolite, which have a small particle size and a high specific surface area (Schnitzer, 1978; Dahlgren et al., 1993). The presence of these amorphous constituents renders a typically highly stable granular microstructure, within which SOM is possibly preserved from microbial attack through physical protection –either because of inaccessibility and/or the existence of temporarily water saturated conditions within microaggregates (Buurman et al., 2007; Gonzalez-Perez et al., 2007). Aluminum-humus complexes are dominant in alu-andic Andosols. These form as a result of the interaction between organic acidity and Al alkalinity (Skylberg, 1999), primarily through the binding of Al on carboxylic functional groups, the latter mostly attached to aromatic rings or molecules containing aromatic rings (Scheel et al., 2008). This process predominantly takes place at pH < 4.9–5.0 through ligand exchange reactions (Scheel et al., 2008), which are known to be very resistant to decomposition. Above pH 5, the aqueous concentrations of Al are reduced by the decreased solubility of Al, and the OH<sup>−</sup> ions compete with organic ligands for Al (Dahlgren et al., 1993).

Despite the high stability of Al-humus complexes and organo-mineral associations abundant in Andosols, these soils are vulnerable to effects produced as a result of land use change (Parfitt et al., 1997; Verde et al., 2005). Tilling accelerates oxidation of organic C to CO<sub>2</sub> through (i) an increase in soil aeration, and (ii) destruction of soil aggregates with exposure of SOM to microbial attack (Beare et al., 1994; Paustian et al., 1999; Tan et al., 2004). With tillage, however, the relative importance of the organo-mineral associations to SOM stabilization increases, as that of the biogenic aggregation decreases (von Lützow et al., 2008). Mineralization of SOM is also promoted by the addition of exogenous nutrients, as occurs with fertilization. The nitrification occurring after NH<sub>4</sub><sup>+</sup> fertilization has, on the other hand, an acidifying effect on the soil (Mora and Barrow, 1996; Egiarte et al., 2005), promoting the dissolution of labile organo-aluminic complexes when the pH falls below 4.2 (Camps Arbestain et al., 2003). Liming produces an increase in soil pH, leading to hydrolyzation and polymerization of Al, thus favouring the precipitation of amorphous Al-hydroxides and Al-OH reactive forms (Bloom, 1981; Haynes and Swift, 1989). Finally, the lack of vegetation cover during part of the year, common in agricultural soils, causes greater temperature fluctuations in soils than in the original native ecosystems. This leads to greater oscillations in soil moisture, favouring dehydration reactions in SOM and promoting the rupture of weak links between the SOM and hydroxyl-Al (Haynes and Swift, 1989). The increase in unprotected SOM induced by drying and wetting cycles produces flushes of microbial activity and mineralization of soil organic C. As a result, nutrients are released and their availability is thus increased in the short term (Chepkwony et al., 2001).

However, to date no studies of the specific effects of the different above-mentioned agricultural practices and their interactions with andic soil properties have been carried out. For a more in-depth research on these effects, a laboratory experiment was designed to simulate liming, tilling, and fertilizing practices and



temperature fluctuations in an alu-andic Andosol, under free draining conditions. Special attention was given to the changes in soil and leachates chemistry.

## 2. Material and Methods

### 2.1. – Experimental design

An A horizon (0-30 cm depth) of a Typic Fulvudand (Soil Survey Staff, 2006) located in Boqueixon (A Coruna, NW Spain) (Table 1) under gorse (*Ulex europaeus* L.) vegetation was sampled. The soil was air-dried and passed through a 2 mm sieve.



*Photo 1.- Experimental design, with 10-cm diameter plastic funnels, in which the experiment was carry out during 16 weeks .*

Soil subsamples of 125 g each were added to 10-cm diameter plastic filtration funnels (Photo 1). Previously, a 1 mm-mesh plastic screen and a thin layer of glass wool was added to the funnels. The height of the soil column was 2 cm. The liming treatment (L) consisted of the addition of  $\text{CaCO}_3$  at a dose equivalent to  $2000 \text{ kg ha}^{-1}$  on days 1 and 57 of the experiment. The fertilizing treatment (F) consisted of the addition of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  at doses equivalent to  $700 \text{ kg ha}^{-1}$  and  $2000 \text{ kg ha}^{-1}$  (592 and  $700 \text{ kg}$  of  $\text{P}_2\text{O}_5$  and N), respectively, on days 1 and 57. In the L+F treatment both the lime and the fertilizers were applied together at the same doses and times as the L and F treatments. On the first day of each week, all soils, except the control soil, were subjected to simulated tilling with a spatula; on the second day of each week, half of the funnels were placed in an oven at  $40^\circ\text{C}$  for 24 hours; on days three, four, and five of each week, all treatments were irrigated

by use of a drip system through which distilled water was applied to the funnels. The total amount of water added at the end of the 16-week experiment was the equivalent of 2000 mm of rain (annual precipitation in the area from which the soil was sampled ranges from 1600 to 2000 mm); no treatments were carried out on days 6 and 7 of each week. Leachates were collected at the end of day 5, stored in 200 mL polyethylene containers, and then analyzed. Overall, the following treatments were considered: Ctrl (control), T (tilling), T+H (tilling + heat), T+L (tilling + liming), T+L+H (tilling + liming + heat), T+F (tilling + fertilizer), L+F+H (tilling + fertilizer + heat), T+L+F (tilling + liming + fertilizer), and T+L+F+H (tilling + liming + fertilizer + heat).

### 2.2. – Chemical determinations

Soil samples were analyzed at the end of the experiment. Soil pH was measured in H<sub>2</sub>O and in 0.1 M KCl (soil:solution, 1:2.5). Total C, H and N contents were determined in a LECO carbon analyser (Model CHNS-932, LECO Corp., St. Joseph, MI). Inorganic C, added to the soils in the limed treatments, was measured with a Bernard calcimeter. The organic C in the samples was estimated as the difference between total C and inorganic C. Aluminum extractable with 0.33 M LaCl<sub>3</sub> (Al<sub>La</sub>) (Hargrove and Thomas, 1981), 0.5 M CuCl<sub>2</sub> (Al<sub>Cu</sub>) (Juo and Kamprath, 1979), sodium pyrophosphate (Al<sub>p</sub>) (Bascomb, 1968), ammonium oxalate (Al<sub>o</sub>) (Blakemore, 1978), and 0.5 M sodium hydroxide (Al<sub>Na</sub>) (Hashimoto and Jackson, 1960) was determined in an atomic absorption spectroscopy (Perkin Elmer 2380, Norwalk, CT). Carbon extractable with pyrophosphate (C<sub>p</sub>) was determined in a TOC-500 analyser (Shimadzu Corp., Tokyo, Japan). Leachates were also analyzed for (i) pH, (ii) dissolved organic C (DOC) with the TOC-500 analyser, (iii) Al<sup>+3</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> and Si<sup>+4</sup> by atomic absorption spectroscopy, and (iv) NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> and PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> by ionic chromatography (Dionex-4500i, Dionex Corp., Sunnyvale, CA). In addition, dissolved Al was speciated into reactive Al (Al<sub>R</sub>) and acid soluble Al (Al<sub>AS</sub>) (Driscoll, 1984). Aluminum was determined by colorimetry with pyrocatechol violet (Dogan and Wilson, 1974).

### 2.3. – Geochemical modelling of leachates

The program PHREEQC of USGS was used to determine the sampling of the main chemical species in dissolution. This program uses equations of balance of matters and electro neutrality to simulate geochemical reactions and includes the effects of variations in temperature (Parkhurst & Appelo, 1999). The results are only estimations *a grosso* because this model does not take into consideration the concentration in dissolved organic compounds. The parameters introduced in the program were pH and concentrations of Al<sup>+3</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Si<sup>+4</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>.

### 2.4. – Statistical analysis

Analysis of variance was carried out following the procedures in SPSS, which allows the user to treat large volumes of data, quickly and relatively easily. Significant differences among mean values were determined at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$  by use of a *Student t test*.

### 3. Results

#### 3.1. – Soil chemical characterization at the end of the experiment

**pH.** In four of the treatments (Ctrl, T, T+H, T+F), the pH of the soils decreased below the initial value (4.60). The greatest decrease in pH occurred in the soil that was only tilled, with a final pH value of 4.17. A large decrease was also observed in the Ctrl soil, with a final pH value of 4.32. The final pH values of the soils subjected to the T+H and T+F treatments were 4.5 and 4.40 respectively. Liming had a clear influence on pH, as expected; the final mean pH of the soils in which liming was included in the treatment was 4.80, which was significantly higher ( $P < 0.01$ ) than the mean pH of the soils subjected to treatments that did not include liming (4.43). Furthermore, in all soils that underwent heat treatment, the mean pH (4.77) was significantly higher ( $P < 0.05$ ) than the mean pH corresponding to the treatments that did not include heating (4.45) (Fig. 1A).

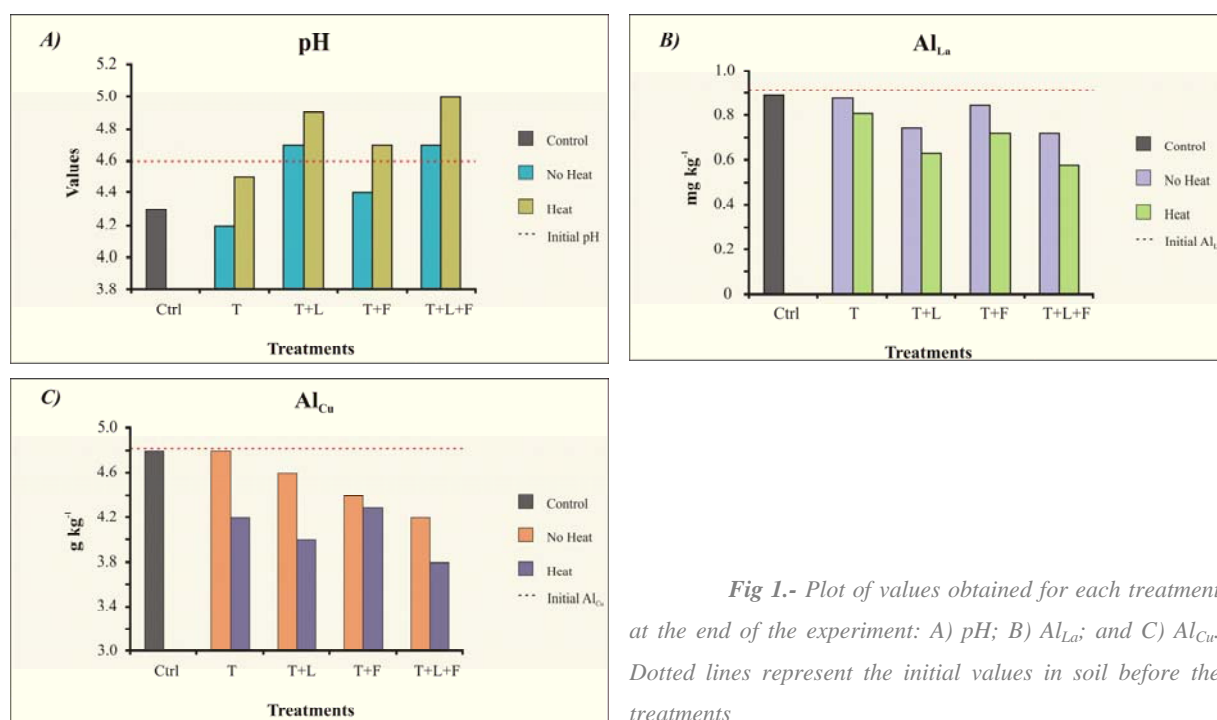


Fig 1.- Plot of values obtained for each treatment at the end of the experiment: A) pH; B)  $Al_{La}$ ; and C)  $Al_{Cu}$ . Dotted lines represent the initial values in soil before the treatments

**Aluminic forms.** All treatments had a clear influence on the concentrations of  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$  (Fig. 1B-C) but not on those of  $Al_p$  and  $Al_o$  (Table 1). All treatments, with the exception of the Ctrl and the tilling only treatment (T) showed a marked decrease in concentrations of  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$  relative to those in the initial soil (Fig. 1B-C). Mean concentrations of  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$  in the heat treated soils (0.70 and 4.09 g kg<sup>-1</sup>, respectively) were significantly lower ( $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively) than those without heat treatment (0.82 and 4.57 g kg<sup>-1</sup>, respectively); the decrease was more pronounced in  $Al_{Cu}$  than in  $Al_{La}$  (Fig. 1B-C). The liming and

Table 1.- Physico-chemical characterization of the different treatments at the end of the experiment.

Treatment	pH <sub>H2O</sub>	C <sub>org</sub>	C <sub>p</sub>	N	C:N	Al <sub>Ls</sub>	Al <sub>Cu</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>o</sub>	Al <sub>n</sub>	Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>o</sub>	Si <sub>o</sub>	Si <sub>n</sub>	Al <sub>o</sub> +1/2Fe <sub>o</sub>	(Al <sub>p</sub> +Fe <sub>p</sub> )/C <sub>p</sub>
		g kg <sup>-1</sup>			mol:mol					g kg <sup>-1</sup>					%	mol:mol
SOIL WITHOUT TREATMENTS																
	4.6	113.0	37.7	9.0	14.6	0.59	4.0	12.1	17.7	22.3	4.3	15.2	2.5	4.8	2.4	0.17
SOIL WITH TREATMENTS																
Ctrl	4.3	110.6	27.1	8.2	15.8	0.89	4.8	10.9	17.8	22.5	4.4	6.8	2.4	4.7	2.1	0.21
T	4.2	112.1	26.0	8.4	15.7	0.88	4.8	11.0	18.5	23.3	4.3	7.4	2.8	4.8	2.2	0.22
T+H	4.5	109.3	41.5	8.0	16.0	0.81	4.2	10.9	18.4	22.6	4.5	7.2	2.7	4.7	2.2	0.14
T+L	4.7	109.8	26.0	8.3	15.5	0.75	4.6	10.6	17.5	22.4	4.3	6.5	2.7	4.5	2.1	0.22
T+L+H	4.9	107.3	45.7	7.7	16.3	0.63	4.0	10.1	18.5	22.2	4.1	7.4	2.9	5.0	2.2	0.12
T+F	4.4	109.9	27.2	8.0	16.1	0.85	4.4	10.5	17.7	21.6	5.0	6.7	3.1	5.1	2.1	0.21
T+F+H	4.7	108.2	37.5	7.7	16.4	0.72	4.3	11.5	18.5	22.5	4.9	7.5	3.4	4.9	2.2	0.16
T+L+F	4.7	106.7	27.7	9.3	13.5	0.72	4.2	10.9	17.1	22.1	4.1	5.9	3.3	4.9	2.0	0.21
T+L+F+H	5.0	108.1	45.4	8.0	15.9	0.58	3.8	10.4	17.9	21.7	3.7	7.2	3.4	4.9	2.2	0.12
Average Heat (n=4)	4.8	105.9	42.5	7.9	16.2	0.69	4.1	10.7	18.3	22.3	4.3	7.3	3.1	4.9	2.2	0.14
Average No Heat (n=4)	4.5	107.8	26.8	8.4	15.3	0.82	4.6	10.8	17.7	22.4	4.4	6.7	2.9	4.8	2.1	0.21
Signification level	* <sup>a</sup>	n.s. <sup>b</sup>	***	*	n.s.	*	**	n.s.	*	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	*	**

<sup>a</sup> \*, \*\*, \*\*\*: The differences between treatments with and without heat were significant at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively.<sup>b</sup> n.s.: No differences were found at  $P < 0.05$ .

fertilizing also had an effect on the concentrations of these two parameters ( $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$ ), which were generally lower than in the initial soil. The combination of liming, fertilizing and heat resulted in the lowest concentrations of  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$ , 0.58 and 3.8 g kg<sup>-1</sup> respectively.

**Total organic C,  $C_p$  and total N.** The treatments under study had no effect on the concentration of total organic C (Table 2), at least during the 16 weeks that the experiment lasted. Mean concentrations corresponding to the treatments with and without heat were 109.6 and 108.2 g kg<sup>-1</sup>, respectively. These were slightly lower than the concentrations in the Ctrl soil (110.6 g kg<sup>-1</sup>) and the initial soil (113.0 g kg<sup>-1</sup>). On the other hand, the heat treatments had significant effects ( $P < 0.01$ ) on the  $C_p$  concentrations, with mean values of 26.7 and 42.5 g kg<sup>-1</sup> for the treatments without and with heat, respectively (Table 2). The former mean value is similar to that in the Ctrl (27.1 g kg<sup>-1</sup>), whereas the latter is similar to that in the initial soil (37.7 g kg<sup>-1</sup>). Likewise, significant differences ( $P < 0.05$ ) were observed in the mean total N concentrations in the soils subjected to treatments without and with heat, with mean values of 8.5 and 7.9 g kg<sup>-1</sup>, respectively. However, there was no clear effect (not significant at  $P < 0.05$ ) on the total N values for the fertilized soils (mean = 8.3 g kg<sup>-1</sup>), as compared with the unfertilized soils (mean = 8.1 g kg<sup>-1</sup>).

### 3.2. – Chemical characterization of leachates

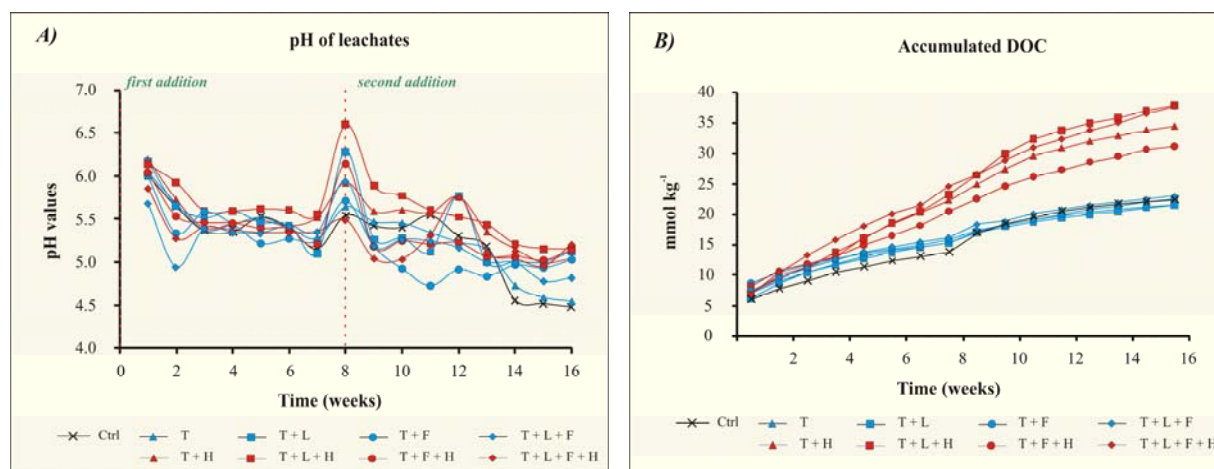


Fig 2.- Temporal changes during the 16 weeks of the experiment: A) pH solution; B) accumulated DOC.

**pH of leachates.** A general decreasing trend in the pH of leachates was observed throughout the experimental period, although a sharp peak was observed at week 9, coinciding with the second addition of amendments to the soils (Fig. 2A). At the end of the experiment, the lowest pH values corresponded to the soils subjected to the Ctrl and T treatments, followed by T+F treatment (4.49, 4.55 and 4.82, respectively). This trend is consistent with that observed for the pH of the corresponding soils (Fig. 1A). Leachates from soils that underwent heat treatments showed the highest pH (mean pH = 5.14), and were significantly higher ( $P < 0.01$ ) than those corresponding to treatment without heat (mean pH = 4.80). The pH of the leachates from limed soils,

without heat treatment (mean pH = 5.07), was similar to that of the leachates from soils subjected to treatments that included heat.

**DOC in leachates.** A greater release of DOC was detected (significant at  $P < 0.01$ ) in heat-treated soils than in unheated soils (Fig. 2B), with average accumulative values of 35.40 and 22.32 mmol kg<sup>-1</sup> respectively. The release of DOC from heated soils followed the order T+L = T+L + F > T > T+F, and was therefore greater in limed soils. As with the pH values, there was a general increase in the release of DOC after the second application of amendment (day 57).

**Al and Si in leachates.** Greater release of Al was observed from heated soils (significant at  $P < 0.05$ ) than from unheated soils (Fig. 3A), as observed for DOC. However, there were clear differences in the pattern of Al release in comparison with the pattern observed for the DOC. Basically, the amount of Al released from the heat-treated soils followed the order T+F + L > T + F ~ T ~ T+L. The increase in Al in solution in heated soils was paralleled by an increase in Al<sub>R</sub> and non reactive forms of Al (Fig. 3B). Cumulative concentrations of Al in the leachates from the T+F treated soils were (until week 13) greater than those of the Ctrl treatment (Fig. 3A). This indicates greater acidification, probably associated with nitrification of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> from the N fertilizer. From this week onwards, the greatest acidification (Fig. 2A) detected in Ctrl and T treatment was paralleled by enhanced solubilization of Al (Fig. 3A).

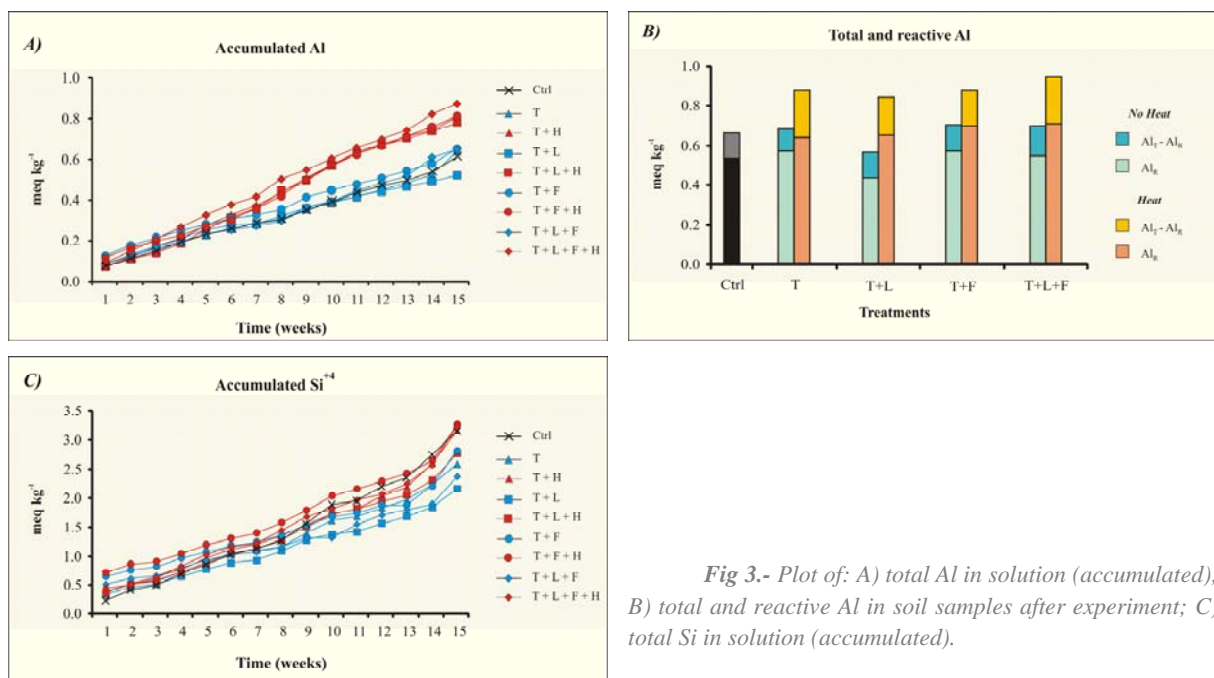


Fig 3.- Plot of: A) total Al in solution (accumulated); B) total and reactive Al in soil samples after experiment; C) total Si in solution (accumulated).



As regards the concentrations of Si, greater release of Si into the soil solution also occurred in the heat-treated soils (significant at  $P < 0.05$ ) than the non-heat treated soils (Fig. 3C). Cumulative mean values were 0.71 and 0.60 mmol kg<sup>-1</sup>, respectively, although differences were not as evident as those observed for pH values and Al concentrations (Fig. 2B and 3A). The greatest release of Si was from fertilized soils and the lowest release from tilled soils, although the differences were not significant ( $P < 0.05$ ). It should be noted that final cumulative Si released from the Ctrl soil was higher than that of any other treatment, except for the T+L+H treatment (Fig. 3C). Thus the amendments tended to reduce Si release from soils.

**$\text{Ca}^{+2}$  and  $\text{Mg}^{+2}$  in leachates.** The release of  $\text{Ca}^{+2}$  to solution was significantly greater ( $P < 0.01$ ) in treatments T+L+F, with or without heat, than in the other treatments (Fig. 4A), as expected. Final cumulative mean values were 2.45 and 3.06 meq kg<sup>-1</sup> in the former, and 1.2 meq kg<sup>-1</sup> in the latter. However, the data revealed a negative influence of heat on the solubilization of  $\text{Ca}^{+2}$  in limed soils (T+L and T+L+F) relative to the corresponding treatments without heat (Fig. 4A). Moreover, the solubilization of  $\text{Ca}^{+2}$  in T+F and T+L treated soils, both without heat, were very similar (it should be noted that the fertilization included the addition of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ). Heat supply had a distinct effect on the release of this cation from soils in these treatments, and was positive for the treatment T+F and negative for the T+L treatment (Fig. 4A). Fertilization (with or without heat) caused a release of  $\text{Mg}^{+2}$  to the solution (final accumulated total value of 0.07 meq kg<sup>-1</sup>) (Fig. 4B) and the differences increased in the second half of the experiment after the application of the second amendment. Again, the effect of heat had an inverse effect on release of this cation, as it was positive for the T+F treatment and negative for the treatments in which  $\text{CaCO}_3$  (T+L and T+L+F) was added.

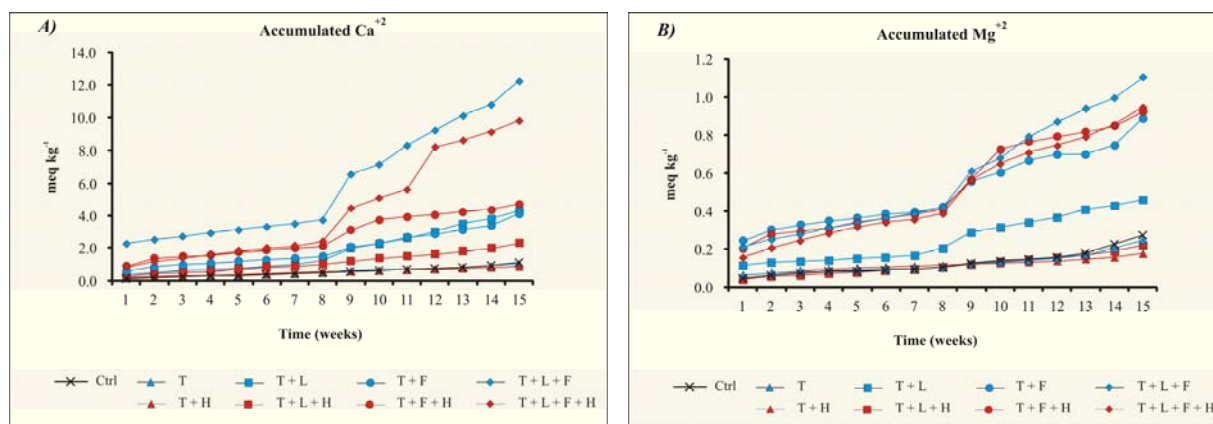


Fig 4.- Temporal changes in some basic cations included in the leachates: A) accumulated  $\text{Ca}^{+2}$ ; B) accumulated  $\text{Mg}^{+2}$ .

**$\text{SO}_4^{-2}$  and  $\text{NO}_3^-$  in leachates.** Solubilization of  $\text{SO}_4^{-2}$  was generally greater in the fertilized soils (with or without heat supply) than in the non-fertilized soils ( $P < 0.01$ ). This was more pronounced, although not significant ( $P < 0.05$ ), in those soils subjected to fertilization plus heat, and the effect increased after the second amendment (Fig. 5A). Greater release of  $\text{NO}_3^-$  was observed in the fertilized soils (significant at  $P < 0.01$ ) than in the non fertilized ones, as expected, as highly soluble N forms were added to the former (Fig. 5B). The mean

concentration of cumulative  $\text{NO}_3^-$  leached from fertilized soils at the end of the experiment was  $11.39 \text{ meq kg}^{-1}$ , whereas that corresponding to unfertilized soils was  $2.21 \text{ meq kg}^{-1}$ . The behaviour of  $\text{NO}_3^-$  was very similar to that observed for  $\text{Mg}^{+2}$  (Fig. 4B).

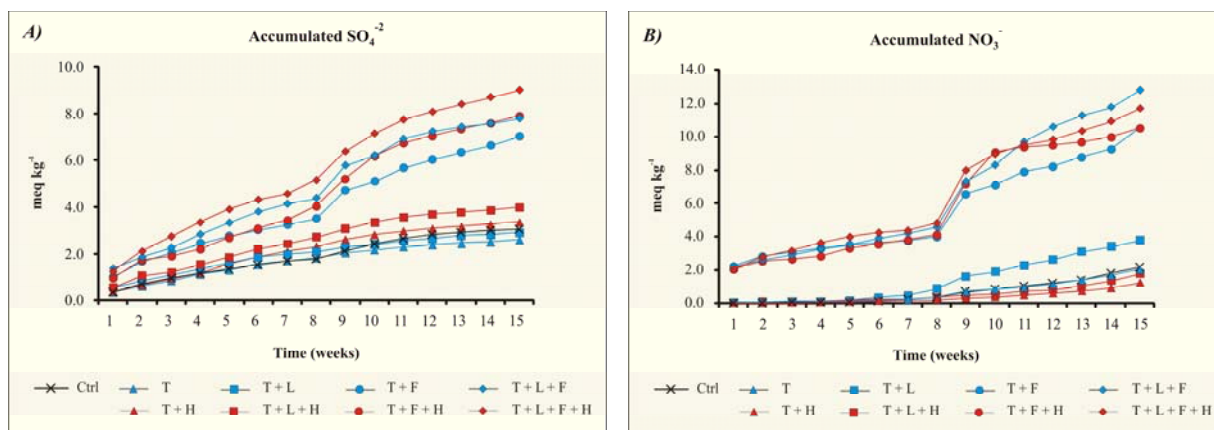


Fig 5.- A) Accumulated  $\text{SO}_4^{2-}$ ; and B) accumulated  $\text{NO}_3^-$ , during the 16 weeks of experiment.

## 4. Discussion

### 4.1. – Interactions between pH, Al, and MO

Greater acidification was detected in soils without amendments (e.g., Ctrl and T treatments with and without heat supply) than in amended soils. This was attributed to the lower acid neutralizing capacity (ANC) of the former in face of the intense leaching. The results obtained thus reveal that, with few exceptions, the amendments used provided additional ANC to the soils, in the short term. The increase in pH with liming was, however, not large, as Andosols are highly buffered within the interval corresponding to the Al buffer. Nonetheless, the T+F treatment, both with and without heat, underwent an important acidification process at the end of the experiment, attributed to the acidity primarily associated with nitrification. The lower ANC of these three treatments (Ctrl, T and T+F) was especially evident in the last 3 weeks of the experiment, in which there was a marked decrease in the pH of leachates (to  $< 5.1$ ) followed by an greater release of Al to solution. On the other hand, the general increase in pH in soils subjected to treatments including heat was attributed to the loss of acidic groups along with leaching of DOC and/or processes of dehydration and organic matter condensation, as well as to other possible processes, which are discussed in more detail below. The increase in pH observed with the heat treatment was, however, less than that observed with the addition of liming material to soils.

The general decrease in  $\text{Al}_{\text{La}}$  and  $\text{Al}_{\text{Cu}}$  values observed, but not detected in the  $\text{Al}_{\text{p}}$  and  $\text{Al}_{\text{o}}$ , indicates that the most labile organo-aluminic complexes – as described by Urrutia et al. (1995) – are susceptible to disruption with the treatments under study. This is in agreement with the findings of Verde et al. (2005), working with

forest and agricultural soils from the same area, who detected a sharp decrease in  $Al_{Cu}$  values after land use change from forest to agriculture. The individual effect of temperature on the  $Al_{Cu}$  value was greater than that corresponding to the other treatments (tilling/fertilizing). The destruction of the most labile organo-aluminic complexes was even more marked with the simultaneous supply of heat and amendments (fertilizers and lime), with the maximum effect reached with the combination of all treatments. The decrease in concentrations of  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$  was paralleled by an increase in concentrations of Al and DOC in leachates and in soil pH.

We hypothesize that the heating of a wet soil produces a similar effect to the addition of hot water, on the extraction of labile soil organic matter (Chantigny, 2003). The hot water methodology – which usually consisting in a hot water extraction at 70 °C – has been reported to induce hydrolyzation of soil organic matter (von Lützow et al., 2007) and extract microbial biomass C (Sparling et al., 1998). A recent research carried out at water temperatures ranging from 20 to 80 °C, however, suggests that the increase in DOC brought about by hot water may also be a mechanism to balance the cations released in the process (Curtin et al., 2008, in revision), as inorganic anions generally bind more strongly to soil surfaces. The composition of DOC from a hot water extraction basically consists of carbohydrates and N-containing compounds (Leinweber et al., 1995). These compounds are probably weakly sorbed to mineral surfaces or humic macromolecules with weakly bound Al. The rupture of the most labile Al-humus complexes would thus explain both the decrease in  $Al_{Cu}$ , and the increase in concentrations of DOC and Al (including dissolved organo-aluminic complexes or in colloidal form) in solution. The wetting and drying cycling induced by with the heat treatment followed by irrigation may have also promoted these ruptures, producing a flush in soil organic C and N available for mineralization (Appel, 1998). The observed increase in pH, along with the changes in the former properties may be attributed to (i) the loss of acidic groups present in released DOC, (ii) a flush of ammonification following rewetting (Naidu and Haynes, 1999), and (iii) the loss of  $CO_2$  upon heating. The dehydration process may also promote slight structural changes, which may explain the higher concentrations of  $C_p$  in heated soils than in non-heated soils.

The effect of liming on the stability of organo-aluminic complexes is better known. The increase in pH associated with the addition of  $CaCO_3$  favours hydrolyzation and polymerization of the Al displaced by Ca from the exchange sites and of that associated with SOM. In addition, with the increase in pH, the  $OH^-$  groups would outcompete with organic functional groups (e.g., carboxylic groups) for Al. All this would explain the decrease in  $Al_{La}$  and  $Al_{Cu}$  observed after liming. The results also revealed the well known decrease in  $CaCO_3$  solubility with temperature, which weakened the negative effect of lime on the stability of organo-aluminum complexes. Nonetheless, the direct effect of heating on the stability of these complexes appeared to be much greater than the effect of liming.

#### 4.2. $-Ca^{+2}$ , $Mg^{+2}$ , $SO_4^{-2}$ and $NO_3^-$ behaviour

The greater amount of  $Ca^{+2}$  in solution detected in the soils subjected to T+L+F treatments (with or without heat) than in those subjected to the T+L treatments (with or without heat) was attributed to (i) local acidification mainly caused by nitrification, which favoured solubilization of  $CaCO_3$  (the fact that the release of

$\text{Ca}^{+2}$  is greater without heat than with heat further confirms what is stated above), (ii) the additional presence of Ca in the P fertilizer ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), and (iii) the displacement of exchangeable  $\text{Ca}^{+2}$  by  $\text{NH}_4^+$ . The latter two factors may also explain the release of  $\text{Ca}^{+2}$  in the fertilizer-only treatments. Calcium concentrations in the leachates from the T+L+F treated soils (with or without heat) increased markedly after the second amendment. The presence of a considerable nitrifying population – greater than that at the beginning of the experiment after the first addition of  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – may have favoured rapid oxidation of the newly added  $\text{NH}_4^+$ , with the subsequent acidification and solubilization of  $\text{CaCO}_3$ .

The amount of  $\text{Mg}^{+2}$  released into solution was much less than the amount of  $\text{Ca}^{+2}$ , as expected, as the former was not contained in the amendments used. Nonetheless, the treatments including fertilizer (T+F and T+L+F, with or without heat) enhanced release of  $\text{Mg}^{+2}$ . This was attributed to the displacement of the element from the exchange sites by  $\text{NH}_4^+$  (from  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) and the  $\text{Ca}^{2+}$  (from  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ). The liming had also some influence, although less evident. The weaker influence of the latter when heat was applied was again attributed to the lower solubility of  $\text{CaCO}_3$  with heat.

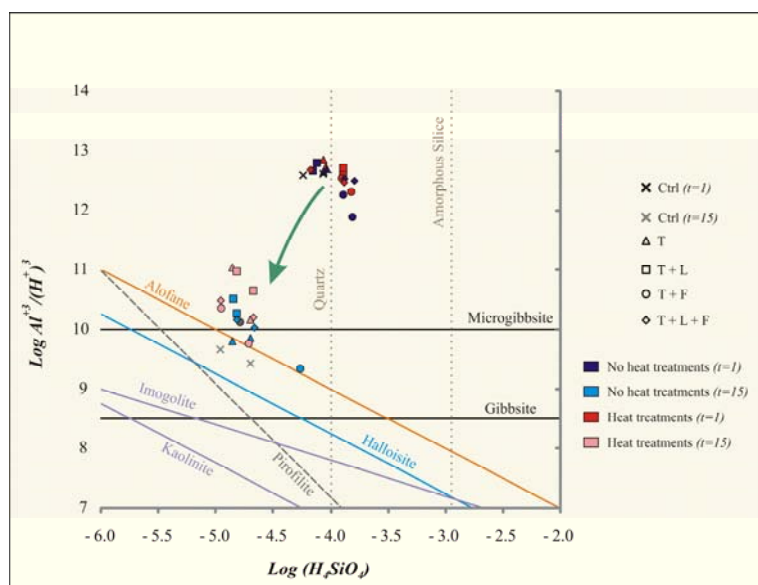
The concentration of  $\text{SO}_4^{-2}$  in the leachates was greatly influenced by the addition of fertilizer (T+F and T+L+F, with or without heat supply). The addition of the  $\text{PO}_4^{-3}$  anion, with a greater affinity than the  $\text{SO}_4$  for reactive surfaces (Camps Arbestain et al., 2002), would probably have caused displacement of the latter by the former. The ability of  $\text{PO}_4^{-3}$  to displace sorbed organic C is also well known (Camps Arbestain et al., 2002). In this study, however, the main release of DOC was attributed to factors other than fertilizers, as explained before. Finally,  $\text{NO}_3^-$  was particularly abundant in the leachates from fertilized soils, as expected. The release was further boosted after a second amendment, attributed to a greater presence of a nitrifying population.

### 4.3. – Mineral stability

The Si and Al together with oxygen are the most frequent elements on the earth's crust; this is because they are the main constituents in the great existing variety of silicates, oxides and hydroxides, present in rocks, sediments and soils. The conditions of mineral formation, which are part of, were very different to the ones found actually on the crust's earth, causing most of them to be subject to weathering processes causing the liberalization of Si and Al towards the soil's dissolution. The knowledge of the mechanisms, weathering levels and the neo-formation of secondary aluminosilicates, controlled mainly by the chemistry of the aqueous solutions, (Schonorr, 1990; White and Brantley, 1995; Berner and Berner, 1996), has a great importance in the evaluation of the geochemical and biological cycles of these elements, (Wollast and Mackenzie, 1983; Sparks and Suarez, 1991; Siever, 1992; Berner, 1995; Exley, 1998; Kump et al., 2000; Treguer and Pondaven, 2000; Conley, 2002), and also to improve the knowledge of the adsorption processes of organic matter to the soil. (Parfitt, 1978; Berggren and Mulder, 1995; Gérard et al., 2001; Gehlen et al., 2002; Perry et al., 2003; Farmer et al., 2005).

Fig. 6 shows the mineral stabilization model chart where it is compared the soil's dissolution at the beginning ( $t = 1$ ; day 5) and at the end ( $t = 15$ ; day 102) of the experiment. In this chart, it is observed that after

the first addition of water, an oversaturation on the soil's dissolution happens as a consequence of the changes induced in the environment, this way the soil's dissolution is oversaturated all system's mineral forms  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , including the amorphous ones, therefore these dissolutions evolution will caused the initial formation of meta-stable allophanes and with time, forms of greater order will take place, but also meta-stables, like the association halloysite – gibbsite. The Si activity is controlled, in all cases, by the balance of quartz and the potential aluminic, with very high values of  $\text{Log Al}^{+3} - 3 \text{ pH}$ , which indicates and excess of Al concentration in comparison to the balance with the mineral phases, including the amorphous ones. This could be attributed to the solubilisation of the organo-aluminic complexes of greater lability. Only after a long evolution period, the stable thermodynamically minerals would be formed. These are the kaolanites of greater cristalinity. This mineral evolution is observed in the alteration and edafogenesis in Galician basic rocks with udic regimen, characterized by the presence of low grade order forms in horizons rich in organic matter, (mainly in  $\text{Ah}_2$ ) and a progressive apparition of the association halloysite-gibbsite in horizons with lesser content of organic matter, which can be attributed to an anti gibbsite effect on the organic matter which would retain part of the Al in a form of complexes. These situations with amorphous, gibbsite and halloysitic filosilicates 1:1 associated to organoaluminic complexes would explain the aluandic character dominant in Galician Andosols, which andic properties are clearly restricted to the horizons rich in organic matter and they are lost once the soil evolves first with formation of ferralic properties and later with true Ferralsols.



*Fig 6.- Mineral stability model of Al and Si forms for each studied samples and for  $t = 1$  and  $t = 15$  (days 5 and 102 of experiment respectively). The black arrow shows the trend after carry out the experiment.*

With the treatment's time there is an important change on the conditions of the edaficos balances (Fig. 6). All treatments reduce the Si activity and reaches values of instauration to the quartz. The aluminic potential is also reduced and has values close to a possible balance with the microgibbsite and the alophanes and it does not need the existence of complex Al forms to justify the excess of over saturation in respect to the mineral forms.

These changes reduce the possibility to form minerals 1:1, favouring the most aluminic forms. Therefore the gibbsite becomes more stable than the halloysite, although the most stable thermodynamic specie is the kaolinite. The same way, is proofed that the treatments reduce the possibility of allophones formations and the gibbsite's microcrystalline forms practically in balance. This would allow to predict an increase of the degree of organization in the mineral association with formation of halloysite, gibbsite and imogolite in the initial stages and, the same as before, the final formation of kaolinite. So, all treatments, tiling, liming, fertilising and heating reduce the over saturation of forms of lower degree of order and, also, the stability of labile organo-aluminic complexes, all these takes to the conclusion that the andic properties are reduced, as it has been checked in the crop system (Verde et al., 2005). The same way, these results are the same as obtained with the AlCu (Fig.1) and accumulated DOC (Fig. 2 B), with a detriment in all treatments, except in the control and tiling without temperature, and specially in the thermic treatments, this confirms that the Al-humus complexes are the most susceptible to the degradation after the changes caused by the change in the soil's usage.

## 5. Conclusions

The treatments carried out with an alu-andic Andosol under laboratory conditions – through the simulation of the different agricultural practices (liming, fertilizing, tilling), in addition to simulation of the effect of increase of temperature to 40 °C associated with the lack of vegetation cover in agricultural soil (with all treatments including intense irrigation) – indicate a clear disruptive effect on the stability of the organo-aluminic complexes. Supply of heat to the soils had a dramatic effect on the stability of labile organo-Al complexes, especially when all treatments were combined (T+F+L+H). This was paralleled by a boost in the DOC and Al released into solution, and an increase in soil pH. We hypothesize that heating a wet soil produces a similar effect on the extraction of labile SOM to that of addition of hot water. Rupture of the most labile Al-humus complexes would explain the patterns of abundance of DOC and Al. The wetting and drying cycling induced by the heat treatment followed by irrigation may have also promoted these ruptures. Heat also produced a liming effect, which could be attributed to loss of organic acidic groups along with the removal of labile SOM, the lost of CO<sub>2</sub>, and/or and enhanced ammonification.

Overall, the results showed how the loss of andic soil properties after land use change may occur as the result of the combination of the different agricultural practices investigated, with the effect of heat supply (simulating the lack of surface coverage) being the most important factor. The results obtained lead us to consider to what point these processes are reversible. That is, whether the andic properties could be recovered when inducing the reverse conversion (e.g., agricultural to forest use) and promoting the same biogeochemical conditions that originally generated these properties. These are basically a rapid weathering of the amphibolitic material in an acid environment and intense interaction between weathering products and products resulting from biotic activity. We are not aware of the existence of studies focused on the reversibility of andic properties, except for the findings of Caner et al. (2000) in Indian Andisols developed from highly weathered soil materials.



We believe that more studies should be carried out in this regard, especially if we take into account the implications of carbon stability within the framework of the Kyoto Protocol.

## **6. Acknowledgements**

The authors thank Veli Carballal and Adriana Mendez, of the Department of Edafology and Agricultural Chemistry of Biology Faculty (University of Santiago of Compostela) for help with soil analyses, as well as the members of the Physical chemistry team at the Instituto de Investigaciones Tecnológicas (Universidad de Santiago de Compostela) for their help in interpreting the results.

## 7. References

- Appel, T. 1998. Non-biomass soil organic N – the substrate for N mineralization flushes following soil drying-rewetting and for organic N rendered  $\text{CaCl}_2$ -extractable upon soil drying. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1445-1456.
- Bascomb, C.L. 1968. Distribution of pyrophosphate iron and organic carbon in soils of various groups. *J. Soil Sci.* 19: 251-256.
- Beare, M.H., Cabrera, M.L., Hendrix, P.F., and Coleman, D.C. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 787-795.
- Berggren, D., and Mulder, J. 1995. The role of organic matter in controlling aluminium solubility in acidic mineral soil horizons. *Geochimica and Cosmochimica Acta.* 59: 4167-4180.
- Berner, R.A. 1995. Chemical weathering and its effect on atmospheric  $\text{CO}_2$  and climate. In: White, A.F., Brantley, S.L. (Eds.). Chemical weathering rates of silicate minerals. *Reviews in Mineralogy.* 31: 565-583.
- Berner, E.K., and Berner, R.A. 1996. *Global Environment. Water, Air, and Geochemical Cycles*, Prentice Hall, 376 pp.
- Blakemore, L.C. 1978. Exchange complex dominated by amorphous material (ECDAM). In: *The Andisol Proposal*. (Ed. G.D. Smith). Soil Bureau. Lower Hutt. New Zealand. 21-22 pp.
- Bloom, P.R. 1981. Phosphorus adsorption by an aluminum-peat complex. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 267-272.
- Buurman, P., Peterse, F., and Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils – A pyrolysis-GC/MS study of Costa Rican Andosol catena. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 1330-1347.
- Camps Arbestain, M., Barreal M.E., and Macías, F. 2002. Phosphate and sulphate sorption in Spodosols with albic horizon from Northern Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 464-473.
- Camps Arbestain, M., Barreal M.E., Mourenza, C., Álvarez, E., Kidd, P., and Macías, F. 2003. Rhizosphere chemistry in acid forest soils that differ in their degree of Al-saturation of organic matter. *Soil Sci.* 168: 267-279.
- Caner, L., Bourgeon, G., Toutain, F., and Herbillon, A.J. 2000. Characteristics of non-allophanic Andisols derived from low-activity clay regoliths in the Nilgiri Hills (Southern India). *Eur. J. Soil Sci.* 51: 553-563.

- Chantigny, M.H. 2003. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*. 113: 357-380.
- Chepkwony, C.K., R.J. Haynes, R.S. Swift, and R. Harrison. 2001. Mineralization of soil organic P induced by drying and rewetting as a source of plant-available P in limed and unlimed samples of an acid soil. *Plant and Soil*. 234: 83-90.
- Conley, D.J. 2002. Terrestrial ecosystems and the global biogeochemical silica cycle. *Global Biogeochemistry Cycles*. 16: 1121-1129.
- Curtin, D., M. Chantigny, and M. Beare. 2008. Composition and biodegradability of soil organic matter extracted in water at different temperatures. *Soil – The living skin of planet Earth*. Soils Conference. Palmerston North. New Zealand.
- Curtin, D., M.H. Beare, M.H. Chantigny. Controls on the extractability of soil organic matter in water over the 20 to 80 °C temperature range. Submitted to *Soil Sci. Soc. Am. J.*
- Dahlgren, R.A., Shoji, S., and Nanzyo, M. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In: Shoji, S., Nanzyo, M. and Dahlgren, R.A., Editors, 1993. *Volcanic Ash Soils. Genesis, Properties and Utilization*. Develop. Soil Sci. Elsevier. Amsterdam. 101-143 pp.
- Dougan, W.K., and Wilson, A.L. 1974. The absorptiometric determination of aluminium in water. A comparison of some chromogenic reagents and development of an improved method. *Analyst*. 99: 413- 430.
- Driscoll, C.T. 1984. A procedure for the fractionation of aqueous aluminium in dilute acidic waters. *Intern. J. Environ. Analytical Chem.* 16: 267-283.
- Egiarte, G., Camps Arbestain, M., Alonso, A., Ruíz-Romera, E., and Pinto, M. 2005. Effect of repeated applications of sewage sludge on the fate of N in soils under Monterey pine stands. *For. Ecol. Manage.* 216: 257–269.
- Exley, C., 1998. Silicon in life: A bioinorganic solution to bioorganic essentiality. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 69: 139-144.
- Farmer, V.C., Delbos, E., and Miller, J.D. 2005. The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams. *Geoderma*. 127: 71-79.
- Gehlen, M., Beck, L., Calas, G., Flank, A.M., Van Bennekom, A.J., & Van Beusekom, J.E.E. 2002. Unravelling the atomic structure of biogenic silica: evidence of the structural association of Al and Si in diatom frustules. *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 66: 1601-1609.

- Gérard, F., Boudot, J.P., & Ranger, J. 2001. Consideration of the occurrence of the Al<sub>13</sub> polycation in natural soil solutions and surface waters. *Applicational Geochemistry*. 5: 513-529.
- González-Pérez, J.A., Arbelo, C.D., González-Vila, F.J., Rodríguez Rodríguez, A., Almendros, G., Armas, C.M. and Polvillo, O. 2007. Molecular features of organic matter in diagnostic horizons from Andosols as seen by analytical pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 80: 369-382.
- Hargrove, I., and Thomas, M.R. 1981. Extraction of aluminum in aluminum-organic matter complexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 151-153.
- Hashimoto, I., and Jackson, M.L. 1960. Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. *Clays Clay Miner.* 7: 102-113.
- Haynes, R.J., and Swift, R.S. 1989. The effects of pH and drying on adsorption of phosphate by aluminium-organic matter associations. *J. Soil Sci.* 40: 773-781.
- Juo, A.S.R., and Kamprath, E.J. 1979. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 35-38.
- Kump, L.R., Brantley, S.L., & Arthur, M.A. 2000. Chemical weathering, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Annual Review of Earth Planet Science*. 28: 611-667.
- Leinweber, P., Schultern, H. -R., and Körschens, M. 1995. Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biol. Fert. Soils*. 20: 17-23.
- Lützow von, M.; Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 426-445.
- Mora, M.L., and Barrow, N.J. 1996. The effects of time of incubation on the relation between charge and pH of soil. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 131-136.
- Naidu, R., and Haynes, R.J. 1999. Effects of liming and drying and rewetting cycles on composition of saturation paste extracts of a Fijian Oxisol. *Trop. Agric.* 76: 29-35
- Parfitt, R.L., 1978. Anion adsorption by soils and soil materials. Dep. Argon. Ser. 1225 pp.
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S., and Shepherd, T.G. 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*. 75: 1-12.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., and Hunt, H.W. 1999. Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*. 48: 147-163.

- Perry, C.C., Belton, D., and Shafran, K. 2003. Studies of biosilicas: structural aspects, chemical principles, model studies and the future. In: Müller, W.E. G. (Ed.), *Silicon Biomineralization. Biology – Biochemistry – Molecular Biology – Biotechnology*, Springer Verlag, Berlin. 340 pp.
- Scheel, T., Haumaier, L., Ellerbrock, R.H., Rühlmann, J., Kalbitz, K. 2008. Properties of organic matter precipitated from acidic forest soil solutions. *Org. Geochem.* 39:1439-1453.
- Schnitzer, M. 1978. Humic Substances: Chemistry and Reactions. In: Schnitzer, M. and Khan, S.U. (Ed.). *Soil Organic Matter*. Elsevier, Amsterdam. 1-64 pp.
- Schonorr, J.L. 1990. Kinetics of chemical weathering: A comparison of laboratory and field weathering rates. In: Stumm, W. (Ed.). *Aquatic Chemical Kinetics*. Wiley-Interscience, New York. 475-504 pp
- Siever, R. 1992. The silica cycle in the Precambrian. *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 56: 3265-3272.
- Skyllberg, U. 1999. pH and solubility of aluminium in acidic forest soils: a consequence of reactions between organic acidity and aluminium alkalinity. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 95-106.
- Soil Survey Staff, US. Soil Conservation Service, 2006. Keys of Soil Taxonomy 10<sup>th</sup> ed. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Washington DC.
- Sparks, D.L., and Suarez, D.L.E. 1991. Rates of soil chemical processes. *Soil Science Society of America*. Special Publication 27. Madison 27.
- Sparling, G.P., Vojvodic-Vukovic, M., and Schipper, L.A. 1998. Hot water soluble C as simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 30: 1469-1472.
- Tan, Z.X., Lal, R., Izaurralde, R.C., and Post, V. 2004. Biochemically protected soil organic carbon associated with aggregates in North Appalachian Experimental Watersheds. *Soil Sci.* 169: 423-433.
- Treguer, P., and Pondaven, P. 2000. Global change silica control of carbon dioxide. *Nature*. 406: 358-359.
- Urrutia, M. Macías, F. and García-Rodríguez, E. 1995. An assessment of CuCl<sub>2</sub> and LaCl<sub>3</sub> as extractants for aluminum in acid soils from Galicia (in Spanish, with English abstract). *Nova Acta Cient. Compost. (BioloXía)*. 5: 173-182.
- Verde, J.R., Camps Arbestain, M., and Macías, F. 2005. Expression of andic soil properties in soils from Galicia (NW Spain) under forest and agricultural use. *Eur. J. Soil Sci.* 56: 63-66.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., and Marschner, B. 2007. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem.* 39: 2183-2207.

- White, A.F., and Brantley, S.L. 1995. Chemical weathering rates of silicate minerals: An overview. *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*. 31: 1-22.
- Wollast, R., and Mackenzie, F.T. 1983. Global cycle of silica. In: Aston S. R. (Ed). *Silicon Geochemistry and Biogeochemistry*. Academic Press. 39-76.





## Annex

---

### *Database Used in the Geochemical Modelling of Leachates*



## DATABASE USED IN THE GEOCHEMICAL MODELING OF LEACHATES.

Table 1.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 12/11 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.96	5.01	0.00	2.32	0.000	16.08	2.00	0.40	5.15	1.60	0.06	0.82
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.08	5.88	0.00	2.58	0.000	16.98	4.20	0.80	7.60	2.40	0.09	0.66
<b>T</b>	6.05	6.09	0.00	2.80	0.000	17.07	3.05	0.80	7.45	2.35	0.08	0.82
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.07	6.00	0.00	2.77	0.000	17.02	3.80	0.80	8.80	2.40	0.09	0.90
<b>T + H</b>	6.23	8.05	0.00	1.48	0.000	17.86	3.80	0.80	10.00	2.50	0.09	0.73
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.17	6.33	0.00	2.93	0.000	16.86	4.00	0.80	8.50	2.40	0.09	0.97
<b>T + L</b>	6.14	6.64	0.00	2.96	0.000	26.26	9.10	1.00	8.70	2.10	0.07	0.96
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.21	5.25	0.00	2.34	0.000	24.88	6.20	1.80	8.70	1.95	0.07	0.62
<b>T + L + H</b>	6.15	5.88	0.00	2.70	0.010	27.95	9.30	1.00	6.70	3.55	0.13	0.73
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.13	6.63	0.00	3.10	0.000	24.33	1.20	0.02	6.70	3.55	0.13	0.65
<b>T + F</b>	5.78	7.72	0.00	159.74	0.000	53.94	10.65	3.24	8.10	3.45	0.12	1.28
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.61	5.81	0.00	120.14	0.000	44.72	12.2	2.68	9.00	4.20	0.15	1.22
<b>T + F + H</b>	5.97	6.9	0.00	146.76	0.000	51.96	17.00	2.72	7.70	3.40	0.12	1.01
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.76	6.76	0.00	107.76	0.000	40.55	18.80	2.20	10.70	4.10	0.15	1.26
<b>T + L + F</b>	6.06	6.09	0.00	120.28	0.000	63.04	42.80	2.32	8.95	3.55	0.13	0.72
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.95	7.57	0.00	154.71	0.000	68.08	47.40	2.76	8.95	4.30	0.15	0.98
<b>T + L + F + H</b>	5.98	6.18	0.00	121.78	0.000	58.76	22.40	2.56	8.55	3.55	0.13	0.84
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	6.12	6.65	0.00	135.55	0.000	61.67	10.40	1.24	4.20	1.80	0.06	0.94

Table 2.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 21/11 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.65	1.74	0.00	0.89	0.019	15.62	1.15	0.22	1.20	2.75	0.10	0.32
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.65	2.19	0.00	1.19	0.000	17.90	1.00	0.20	1.10	3.10	0.11	0.41
<b>T</b>	5.68	2.11	0.00	1.00	0.019	13.47	0.95	0.13	1.00	2.55	0.09	0.37
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.70	2.20	0.00	1.22	0.000	11.91	1.00	0.10	0.80	2.60	0.09	0.28
<b>T + H</b>	5.94	1.71	0.00	0.82	0.015	16.46	1.15	0.19	1.15	3.10	0.11	0.31
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.53	1.32	0.00	0.74	0.000	11.28	1.20	0.10	0.80	2.20	0.08	0.32
<b>T + L</b>	5.69	2.74	0.00	1.38	0.005	18.53	2.75	0.23	1.00	3.35	0.12	0.48
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.63	0.95	0.00	0.62	0.000	10.48	2.40	0.10	0.70	1.60	0.06	0.46
<b>T + L + H</b>	6.05	2.29	0.00	1.12	0.004	15.92	3.50	0.195	0.95	2.95	0.11	0.32
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.82	1.67	0.00	1.91	0.060	33.58	3.00	0.20	0.80	2.60	0.09	0.41
<b>T + F</b>	4.89	2.71	0.00	49.67	0.017	31.17	5.25	0.80	1.50	3.35	0.12	0.59
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.00	1.77	0.00	29.14	0.000	32.75	5.80	0.60	1.40	2.90	0.10	0.43
<b>T + F + H</b>	5.38	2.22	0.00	34.84	0.003	40.26	5.55	0.80	1.75	3.70	0.13	0.45
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.17	2.05	0.00	27.62	0.000	34.07	14.80	1.00	3.82	9.30	0.33	0.50
<b>T + L + F</b>	5.03	1.68	0.00	25.98	0.001	24.21	5.40	0.50	1.00	2.40	0.09	0.37
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.64	1.6	0.00	25.11	0.000	24.24	4.80	0.50	1.10	2.20	0.08	0.39
<b>T + L + F + H</b>	5.69	1.84	0.00	23.64	0.000	33.20	4.35	0.60	1.25	3.00	0.11	0.46
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.39	3.72	0.00	70.00	0.000	51.17	9.10	0.60	2.44	5.50	0.20	0.61

Table 3.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 28/11 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.40	1.14	0.00	0.70	0.010	9.99	0.90	0.11	0.75	1.15	0.04	0.28
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.33	1.60	0.00	1.18	0.000	13.57	1.00	0.10	0.80	1.60	0.06	0.43
<b>T</b>	5.38	1.55	0.00	0.91	0.000	11.77	0.95	0.10	0.75	2.05	0.07	0.38
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.37	1.09	0.00	0.72	0.000	10.01	0.60	0.10	0.70	1.30	0.05	0.37
<b>T + H</b>	5.45	1.70	0.00	1.01	0.000	17.54	1.15	0.12	0.95	2.60	0.09	0.52
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.34	1.04	0.00	0.66	0.000	9.65	0.60	0.10	1.70	1.90	0.07	0.42
<b>T + L</b>	5.50	1.06	0.00	0.71	0.000	9.62	1.55	0.10	0.65	1.85	0.07	0.27
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.53	1.79	0.00	1.25	0.000	13.45	2.00	0.10	0.70	2.20	0.08	0.56
<b>T + L + H</b>	5.58	0.86	0.00	0.52	0.000	8.86	1.70	0.10	0.65	0.95	0.03	0.30
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.61	0.70	0.00	0.50	0.000	6.00	1.40	0.05	0.40	0.70	0.02	0.31
<b>T + F</b>	5.35	1.23	0.00	21.19	0.000	20.05	2.50	0.40	0.90	1.60	0.06	0.43
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.45	0.79	0.00	6.56	0.000	15.06	2.20	0.20	0.70	0.08	0.00	0.26
<b>T + F + H</b>	5.31	1.17	0.00	14.66	0.000	15.62	2.10	0.29	0.85	1.30	0.05	0.52
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.50	0.28	0.00	1.35	0.000	3.25	1.00	0.03	0.20	0.40	0.01	0.16
<b>T + L + F</b>	5.58	1.56	0.00	22.2	0.000	21.19	4.45	0.42	1.00	2.10	0.07	0.36
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.59	0.96	0.00	13.58	0.000	17.41	3.50	0.20	0.70	0.90	0.03	0.33
<b>T + L + F + H</b>	5.51	1.47	0.00	19.02	0.000	19.89	3.75	0.31	0.85	1.60	0.06	0.47
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.42	2.31	0.00	28.38	0.010	39.64	5.40	0.60	1.50	3.00	0.11	0.72

Table 4.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 05/12 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.33	2.18	0.00	1.56	0.570	13.01	1.00	0.11	1.00	1.60	0.06	0.34
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.37	1.72	0.00	1.31	0.150	9.20	1.20	0.10	0.90	1.80	0.06	0.57
<b>T</b>	5.40	1.58	0.00	1.71	0.140	16.01	0.90	0.10	0.90	2.00	0.07	0.44
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.48	0.47	0.50	1.40	0.010	11.01	0.70	0.04	0.60	0.90	0.03	0.29
<b>T + H</b>	5.52	1.54	0.00	0.90	0.040	11.29	0.90	0.09	3.80	1.25	0.05	0.40
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.38	1.91	0.00	0.64	0.070	11.25	0.80	0.10	0.70	1.40	0.05	0.36
<b>T + L</b>	5.62	0.98	0.00	1.63	0.130	11.58	1.25	0.08	0.70	1.15	0.04	0.43
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.57	1.98	0.00	1.84	0.020	14.32	1.80	0.08	0.70	1.50	0.05	0.38
<b>T + L + H</b>	5.53	3.52	0.00	4.01	0.010	24.03	1.90	0.17	1.05	3.00	0.11	0.62
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.66	0.54	0.80	1.56	2.570	8.12	1.80	0.06	1.60	0.90	0.03	0.34
<b>T + F</b>	5.33	1.85	0.00	22.07	0.120	21.64	2.30	0.34	0.85	1.45	0.05	0.33
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.37	0.85	0.00	9.150	0.160	15.44	2.30	0.24	0.70	0.80	0.03	0.28
<b>T + F + H</b>	5.41	1.49	0.00	14.64	0.030	16.54	2.10	0.24	0.80	1.20	0.04	0.31
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.33	1.17	0.00	8.83	0.030	12.48	1.80	0.14	0.60	0.80	0.03	0.17
<b>T + L + F</b>	5.43	2.13	0.00	25.71	0.010	27.94	3.15	0.43	1.00	2.05	0.07	0.32
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.46	1.88	0.00	22.50	0.000	25.75	4.80	0.38	0.9	1.70	0.06	0.26
<b>T + L + F + H</b>	5.46	2.16	0.00	24.90	0.000	24.16	3.85	0.39	0.95	2.05	0.07	0.41
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.45	2.43	0.00	31.18	0.000	32.30	5.00	0.56	1.30	2.40	0.09	0.72

Table 5.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 12/12 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
Ctrl	5.57	0.81	0.00	1.71	0.010	8.23	1.00	0.06	0.75	0.70	0.02	0.33
Ctrl <sub>(duplicate)</sub>	5.49	1.17	0.00	1.49	0.020	8.79	0.90	0.06	0.60	0.60	0.02	0.40
T	5.53	1.39	0.00	1.30	0.010	9.23	0.90	0.05	0.55	0.80	0.03	0.29
T <sub>(duplicate)</sub>	5.52	1.06	0.00	1.49	0.000	9.12	0.80	0.04	0.50	0.70	0.02	0.31
T + H	5.53	2.68	0.00	2.09	0.070	17.29	0.90	0.09	0.85	2.15	0.08	0.63
T + H <sub>(duplicate)</sub>	5.45	2.78	0.00	2.49	0.040	20.13	1.30	0.08	0.90	2.20	0.08	0.69
T + L	5.52	0.77	0.00	5.92	0.010	13.01	1.65	0.08	0.60	0.95	0.03	0.34
T + L <sub>(duplicate)</sub>	5.40	1.62	0.00	4.66	0.000	12.24	2.00	0.08	0.60	1.20	0.04	0.41
T + L + H	5.60	1.60	0.00	2.68	0.010	16.94	2.00	0.11	0.75	1.60	0.06	0.71
T + L + H <sub>(duplicate)</sub>	5.64	1.16	0.00	1.73	0.000	13.10	2.00	0.07	0.60	1.10	0.04	0.58
T + F	5.25	1.01	0.00	14.11	0.000	23.67	2.50	0.26	0.60	0.90	0.03	0.41
T + F <sub>(duplicate)</sub>	5.44	0.53	0.00	3.90	0.000	7.68	1.50	0.12	0.45	0.50	0.02	0.23
T + F + H	5.34	2.10	0.00	33.60	0.000	30.10	3.70	0.58	1.25	2.70	0.10	0.55
T + F + H <sub>(duplicate)</sub>	5.34	1.88	0.00	21.08	0.000	15.78	3.00	0.22	0.80	1.80	0.06	0.32
T + L + F	5.25	1.31	0.00	17.29	0.000	25.59	3.70	0.30	0.80	1.50	0.05	0.38
T + L + F <sub>(duplicate)</sub>	5.18	1.00	0.00	16.31	0.000	21.04	4.00	0.33	0.80	1.60	0.06	0.37
T + L + F + H	5.44	2.05	0.00	29.30	0.020	24.04	4.10	0.43	0.95	2.20	0.08	0.43
T + L + F + H <sub>(duplicate)</sub>	5.35	1.21	0.00	14.69	0.000	30.43	4.50	0.38	0.90	1.60	0.06	0.73

Table 6.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 19/12 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
Ctrl	5.39	1.38	0.00	3.18	0.000	9.13	0.90	0.07	0.55	0.65	0.02	0.24
Ctrl <sub>(duplicate)</sub>	5.41	0.35	0.00	4.26	0.018	7.81	0.80	0.04	0.50	0.50	0.02	0.23
T	5.38	0.98	0.00	3.57	0.000	11.58	0.90	0.05	0.65	0.95	0.03	0.28
T <sub>(duplicate)</sub>	5.42	0.23	0.70	2.39	0.001	10.55	0.90	0.04	0.50	0.80	0.03	0.28
T + H	5.40	1.15	0.00	2.68	0.000	10.33	0.70	0.04	0.55	0.75	0.03	0.22
T + H <sub>(duplicate)</sub>	5.44	1.73	0.00	5.78	0.000	22.00	1.00	0.07	0.80	1.80	0.06	0.77
T + L	5.55	1.01	0.00	6.78	0.000	11.83	1.90	0.09	0.65	0.95	0.03	0.19
T + L <sub>(duplicate)</sub>	5.31	1.15	0.00	9.96	0.000	12.57	2.20	0.10	0.60	1.40	0.05	0.19
T + L + H	5.58	2.04	0.00	2.67	0.000	16.03	1.95	0.11	0.75	1.20	0.04	0.54
T + L + H <sub>(duplicate)</sub>	5.63	2.17	0.00	3.97	0.000	17.32	2.50	0.10	0.80	1.90	0.07	0.58
T + F	5.43	1.15	0.00	12.60	0.000	14.25	2.15	0.26	0.65	1.00	0.04	0.28
T + F <sub>(duplicate)</sub>	5.43	0.56	0.00	5.980	0.000	10.66	1.80	0.19	0.40	0.60	0.02	0.25
T + F + H	5.35	1.23	0.00	11.75	0.015	16.47	1.95	0.22	0.70	0.95	0.03	0.28
T + F + H <sub>(duplicate)</sub>	5.34	1.57	0.00	19.02	0.000	19.34	3.20	0.27	0.70	1.60	0.06	0.38
T + L + F	5.33	1.21	0.00	20.92	0.000	19.91	3.40	0.30	0.75	1.05	0.04	0.16
T + L + F <sub>(duplicate)</sub>	5.21	1.10	0.00	23.60	0.000	26.40	4.40	0.38	0.70	1.10	0.04	0.24
T + L + F + H	5.40	1.69	0.00	22.14	0.000	21.39	3.40	0.32	0.80	1.35	0.05	0.26
T + L + F + H <sub>(duplicate)</sub>	5.39	0.84	0.00	9.54	0.000	18.64	3.40	0.25	0.60	0.80	0.03	0.74



Table 7.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 26/12 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.58	1.04	0.00	5.43	0.030	9.00	0.95	0.08	0.55	0.75	0.03	0.24
<b>Ctrl<sub>(duplicate)</sub></b>	5.62	0.58	0.00	8.67	0.020	8.55	1.00	0.07	0.50	0.60	0.02	0.29
<b>T</b>	5.40	0.65	0.00	3.76	0.020	7.92	0.70	0.04	0.50	0.70	0.02	0.23
<b>T<sub>(duplicate)</sub></b>	5.90	0.68	0.00	4.06	0.000	7.52	0.70	0.04	0.40	0.70	0.02	0.29
<b>T + H</b>	6.04	0.81	0.00	1.39	0.000	6.50	0.80	0.04	0.50	0.75	0.03	0.21
<b>T + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.82	0.71	0.00	2.03	0.000	14.88	0.80	0.06	0.60	1.00	0.04	0.75
<b>T + L</b>	5.68	0.52	0.00	4.41	0.000	6.22	1.80	0.09	0.50	0.7	0.02	0.08
<b>T + L<sub>(duplicate)</sub></b>	6.89	0.59	0.00	10.38	0.000	6.03	2.50	0.13	0.50	0.80	0.03	0.11
<b>T + L + H</b>	6.65	1.17	0.00	2.72	0.000	10.69	1.65	0.08	0.65	0.95	0.03	0.36
<b>T + L + H<sub>(duplicate)</sub></b>	6.55	1.17	0.00	2.85	0.000	12.17	1.70	0.07	0.60	1.00	0.04	0.56
<b>T + F</b>	6.36	0.49	0.00	6.04	0.000	8.72	1.50	0.14	0.45	0.55	0.02	0.19
<b>T + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.56	0.76	0.00	8.59	0.000	9.93	1.60	0.17	0.40	0.70	0.02	0.21
<b>T + F + H</b>	5.48	4.92	0.00	18.99	0.000	20.35	2.35	0.33	0.87	3.20	0.11	0.60
<b>T + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.51	0.99	0.00	11.31	0.000	15.25	1.90	0.20	0.60	0.90	0.03	0.44
<b>T + L + F</b>	5.19	0.84	0.00	17.00	0.000	16.79	3.20	0.27	0.65	0.80	0.03	0.26
<b>T + L + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.24	0.81	0.00	16.62	0.000	15.61	3.90	0.29	0.50	0.70	0.02	0.15
<b>T + L + F + H</b>	6.77	0.88	0.00	8.97	0.000	12.97	2.40	0.19	0.54	0.75	0.03	0.24
<b>T + L + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.53	0.69	0.00	6.38	0.000	11.21	2.80	0.18	0.43	0.50	0.02	0.51

Table 8.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 03/01 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.17	3.13	0.00	5.72	0.000	5.01	1.35	0.10	0.58	3.55	0.13	0.30
<b>Ctrl<sub>(duplicate)</sub></b>	5.14	0.78	0.00	9.02	0.000	2.86	1.90	0.10	0.46	0.50	0.02	0.10
<b>T</b>	5.26	0.68	0.00	7.76	0.000	5.74	1.25	0.07	0.54	0.75	0.03	0.22
<b>T<sub>(duplicate)</sub></b>	5.30	0.78	0.00	8.74	0.000	5.74	1.50	0.07	0.50	0.70	0.02	0.23
<b>T + H</b>	5.49	0.94	0.00	2.22	0.000	12.21	1.30	0.06	0.66	1.00	0.04	0.64
<b>T + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.56	0.58	0.00	1.85	0.000	7.98	1.30	0.04	0.45	0.50	0.02	0.54
<b>T + L</b>	5.18	0.59	0.00	21.75	0.000	5.29	4.20	0.35	0.73	0.95	0.03	0.24
<b>T + L<sub>(duplicate)</sub></b>	5.02	0.84	0.00	30.55	0.000	5.41	6.60	0.52	0.74	1.20	0.04	0.54
<b>T + L + H</b>	5.50	1.32	0.01	3.21	0.000	14.32	2.00	0.11	1.14	1.10	0.04	0.88
<b>T + L + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.62	1.22	0.00	7.17	0.000	11.82	2.40	0.07	1.23	0.90	0.03	0.67
<b>T + F</b>	5.35	0.65	0.00	13.12	0.000	12.03	2.80	0.34	0.76	0.70	0.02	0.30
<b>T + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.36	0.96	0.00	14.21	0.000	13.08	2.60	0.23	1.44	0.70	0.02	0.21
<b>T + F + H</b>	5.34	1.57	0.00	20.32	0.000	27.50	2.80	0.34	0.79	1.30	0.05	0.68
<b>T + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.37	1.57	0.00	20.32	0.000	27.50	2.40	0.27	0.85	1.35	0.05	0.55
<b>T + L + F</b>	5.17	0.94	0.00	30.89	0.000	14.72	4.80	0.47	0.65	0.95	0.03	0.27
<b>T + L + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.33	0.57	0.00	14.24	0.000	8.96	4.40	0.30	0.47	0.50	0.02	0.20
<b>T + L + F + H</b>	5.07	2.56	0.00	45.83	0.000	38.29	6.20	0.60	0.82	2.40	0.09	0.85
<b>T + L + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.36	0.53	0.00	7.30	0.000	18.25	4.20	0.18	0.57	0.70	0.02	0.84

Table 9.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 10/01 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.51	1.85	0.00	8.88	0.000	13.57	0.80	0.13	0.94	2.00	0.07	0.40
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.34	2.25	0.00	29.53	0.000	17.55	1.90	0.42	1.72	3.70	0.13	0.45
<b>T</b>	5.49	1.56	0.00	21.45	0.000	10.81	1.70	0.25	1.04	2.00	0.07	0.46
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.46	1.44	0.00	21.84	0.000	10.78	2.00	0.27	0.96	1.80	0.06	0.44
<b>T + H</b>	5.61	1.30	0.02	4.71	0.000	15.27	0.95	0.09	0.76	1.15	0.04	0.73
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.58	0.74	0.01	4.02	0.000	13.11	0.60	0.06	0.63	0.80	0.03	0.66
<b>T + L</b>	5.31	1.28	0.00	45.69	0.000	9.21	10.80	0.82	1.01	1.75	0.06	0.33
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.22	1.33	0.00	50.44	0.000	9.86	18.80	1.20	0.88	2.00	0.07	0.39
<b>T + L + H</b>	5.86	1.49	0.03	7.43	0.000	16.66	3.50	0.23	0.84	1.20	0.04	0.58
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.92	1.68	0.02	7.28	0.000	16.90	3.60	0.19	0.75	1.40	0.05	0.48
<b>T + F</b>	5.22	2.58	0.00	203.94	0.000	60.36	16.30	2.68	2.37	2.40	0.09	0.67
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.17	2.29	0.00	113.11	0.000	56.89	5.80	0.73	1.90	2.40	0.09	0.50
<b>T + F + H</b>	5.08	1.89	0.00	139.32	0.000	52.22	13.10	1.82	1.72	2.00	0.07	0.69
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.00	2.43	0.00	238.24	0.000	62.98	26.00	2.16	2.85	2.80	0.10	0.88
<b>T + L + F</b>	5.21	2.12	0.00	185.71	0.000	76.63	59.80	2.56	2.03	2.30	0.08	0.51
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.15	1.88	0.00	157.12	0.000	57.22	54.20	2.16	1.70	2.30	0.08	0.83
<b>T + L + F + H</b>	5.21	2.26	0.00	209.91	0.000	62.63	42.40	2.32	2.02	2.40	0.09	0.45
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.15	1.64	0.00	182.54	0.010	53.25	39.20	2.04	1.60	1.40	0.05	0.44

Table 10.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 16/01 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.54	1.62	0.00	9.21	0.000	18.04	0.85	0.10	0.77	1.10	0.04	0.42
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.27	0.91	0.00	10.43	0.000	11.44	0.90	0.19	0.78	0.90	0.03	0.45
<b>T</b>	5.49	0.61	0.00	5.67	0.000	6.13	1.00	0.08	0.54	0.60	0.02	0.33
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.43	0.65	0.00	11.18	0.000	6.03	0.90	0.11	0.66	0.70	0.02	0.31
<b>T + H</b>	5.61	0.87	0.00	4.70	0.000	9.75	1.05	0.08	0.64	0.80	0.03	0.52
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.61	0.58	0.00	4.32	0.000	9.43	0.60	0.07	0.57	0.60	0.02	0.77
<b>T + L</b>	5.23	0.66	0.00	21.21	0.000	5.56	5.30	0.36	0.64	0.75	0.03	0.29
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.33	0.47	0.00	12.58	0.000	4.90	5.40	0.27	0.41	0.50	0.02	0.29
<b>T + L + H</b>	5.78	0.88	0.00	5.67	0.000	15.14	3.55	0.22	0.75	0.90	0.03	0.89
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.77	0.88	0.00	5.36	0.000	10.90	3.50	0.13	0.60	0.80	0.03	0.57
<b>T + F</b>	5.36	0.92	0.00	49.09	0.000	18.13	5.05	0.64	0.67	0.65	0.02	0.30
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.18	0.83	0.00	23.17	0.000	21.62	4.90	0.49	0.62	0.70	0.02	0.31
<b>T + F + H</b>	4.99	1.65	0.00	128.31	0.000	34.69	12.10	2.00	1.20	1.40	0.05	0.74
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.08	1.31	0.00	104.52	0.000	56.09	12.60	1.80	1.10	1.00	0.04	0.71
<b>T + L + F</b>	4.90	0.73	0.00	60.15	0.000	21.50	7.50	0.84	0.80	0.80	0.03	0.31
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.92	0.98	0.00	58.21	0.000	19.00	16.40	0.84	0.75	0.80	0.03	0.32
<b>T + L + F + H</b>	5.22	1.19	0.00	77.31	0.000	52.36	16.65	1.44	1.03	1.00	0.04	0.57
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.28	0.66	0.00	39.79	0.000	22.39	9.40	0.64	0.58	0.50	0.02	0.50

Table 11.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 23/01 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.59	0.78	0.00	7.90	0.000	11.48	0.95	0.09	0.65	0.75	0.03	0.38
<b>Ctrl<sub>(duplicate)</sub></b>	5.51	0.59	0.00	10.78	0.000	12.90	0.90	0.13	0.69	0.70	0.02	0.42
<b>T</b>	5.39	0.60	0.00	8.36	0.000	6.78	0.85	0.10	0.65	0.65	0.02	0.31
<b>T<sub>(duplicate)</sub></b>	5.30	0.47	0.00	7.47	0.000	6.14	0.80	0.10	0.54	0.60	0.02	0.31
<b>T + H</b>	5.44	1.08	0.01	11.27	0.000	9.49	1.05	0.12	0.77	0.90	0.03	0.78
<b>T + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.71	0.33	0.00	2.35	0.000	4.93	0.70	0.03	0.33	0.30	0.01	0.41
<b>T + L</b>	5.09	0.60	0.00	27.24	0.000	9.78	6.15	0.38	0.68	0.70	0.02	0.29
<b>T + L<sub>(duplicate)</sub></b>	5.14	0.46	0.00	19.04	0.000	5.26	6.80	0.33	0.45	0.50	0.02	0.23
<b>T + L + H</b>	5.59	0.60	0.00	7.14	0.000	10.58	2.80	0.16	0.64	0.60	0.02	0.66
<b>T + L + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.62	0.74	0.00	11.69	0.000	11.56	3.00	0.14	0.62	0.80	0.03	0.47
<b>T + F</b>	5.35	0.68	0.00	44.38	0.000	28.21	6.10	0.70	0.74	0.60	0.02	0.26
<b>T + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.15	1.21	0.00	48.06	0.000	24.22	8.00	0.80	0.83	0.90	0.03	0.33
<b>T + F + H</b>	5.37	0.47	0.00	14.94	0.000	16.25	3.00	0.35	0.51	0.45	0.02	0.32
<b>T + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.26	0.62	0.00	20.59	0.000	39.05	4.60	0.60	0.66	0.50	0.02	0.66
<b>T + L + F</b>	4.80	1.04	0.00	75.75	0.000	34.19	14.90	1.10	0.85	0.85	0.03	0.46
<b>T + L + F<sub>(duplicate)</sub></b>	4.65	1.12	0.00	96.51	0.000	34.74	31.20	1.56	0.95	1.00	0.04	0.44
<b>T + L + F + H</b>	5.33	0.46	0.00	12.59	0.000	22.04	5.25	0.39	0.53	0.40	0.01	0.41
<b>T + L + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.09	0.39	1.01	59.88	0.000	36.15	16.00	1.02	0.74	0.60	0.02	0.65

Table 12.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 30/01 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.36	0.72	0.00	11.73	0.000	9.55	0.95	0.11	0.64	0.65	0.02	0.32
<b>Ctrl<sub>(duplicate)</sub></b>	5.25	0.42	0.00	9.66	0.000	6.76	1.10	0.14	0.59	0.50	0.02	0.36
<b>T</b>	5.26	0.51	0.00	10.38	0.000	4.17	0.85	0.12	0.56	0.55	0.02	0.29
<b>T<sub>(duplicate)</sub></b>	5.21	0.42	0.00	12.03	0.000	3.59	1.20	0.16	0.55	0.50	0.02	0.25
<b>T + H</b>	5.64	0.58	0.00	9.76	0.000	6.65	0.80	0.10	0.64	0.65	0.02	0.49
<b>T + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.89	0.38	0.00	4.18	0.000	3.16	0.70	0.03	0.32	0.20	0.01	0.28
<b>T + L</b>	5.59	0.41	0.00	16.94	0.000	3.30	4.70	0.27	0.44	0.40	0.01	0.22
<b>T + L<sub>(duplicate)</sub></b>	5.95	0.48	0.00	26.35	0.000	3.81	10.70	0.41	0.40	0.50	0.02	0.28
<b>T + L + H</b>	5.47	0.46	0.00	9.22	0.000	7.07	2.45	0.13	0.52	0.50	0.02	0.54
<b>T + L + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.59	0.45	0.00	5.59	0.000	4.84	2.30	0.10	0.33	0.40	0.01	0.27
<b>T + F</b>	5.27	0.50	0.00	22.56	0.000	17.20	3.75	0.42	0.45	0.40	0.01	0.21
<b>T + F<sub>(duplicate)</sub></b>	5.07	0.65	0.00	19.84	0.000	18.31	4.00	0.35	0.5	0.50	0.02	0.42
<b>T + F + H</b>	5.34	0.48	0.00	12.15	0.000	13.80	2.65	0.33	0.38	0.32	0.01	0.32
<b>T + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	6.19	0.41	0.00	9.11	0.000	14.90	3.10	0.33	0.36	0.20	0.01	0.46
<b>T + L + F</b>	4.98	0.64	0.00	49.78	0.000	16.53	10.60	0.74	0.53	0.50	0.02	0.36
<b>T + L + F<sub>(duplicate)</sub></b>	4.84	0.62	0.00	64.72	0.000	14.65	26.40	1.18	0.52	0.60	0.02	0.40
<b>T + L + F + H</b>	5.11	0.11	0.00	8.22	0.000	9.18	3.35	0.22	0.32	0.25	0.01	0.24
<b>T + L + F + H<sub>(duplicate)</sub></b>	5.35	0.62	0.00	30.22	0.000	22.89	101.00	0.66	0.52	0.50	0.02	0.55

Table 13.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 06/02 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	5.27	0.66	0.00	10.49	0.000	2.38	1.25	0.22	0.64	0.55	0.02	0.20
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.11	0.48	0.00	16.14	0.000	4.10	1.80	0.27	0.67	0.60	0.02	0.33
<b>T</b>	5.07	0.48	0.00	13.42	0.000	2.27	1.10	0.16	0.57	0.50	0.02	0.25
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.22	0.46	0.00	18.02	0.000	2.94	1.80	0.30	0.65	0.50	0.02	0.41
<b>T + H</b>	5.30	0.59	0.00	9.28	0.000	3.56	1.15	0.16	0.55	0.50	0.02	0.37
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.41	0.46	0.00	7.85	0.000	3.57	1.30	0.07	0.36	0.30	0.01	0.38
<b>T + L</b>	4.95	0.47	0.00	36.31	0.000	6.00	10.00	0.52	0.48	0.50	0.02	0.32
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.04	0.51	0.00	26.84	0.000	5.58	9.80	0.38	0.25	0.50	0.02	0.14
<b>T + L + H</b>	5.45	0.45	0.00	13.86	0.000	4.28	3.70	0.18	0.40	0.40	0.01	0.40
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.43	0.29	0.00	11.53	0.000	3.25	3.20	0.15	0.40	0.45	0.02	0.22
<b>T + F</b>	5.04	0.59	0.00	34.73	0.000	16.07	5.10	-	6.00	0.50	-	0.32
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.96	0.76	0.00	32.83	0.000	13.93	5.10	-	6.00	0.50	-	0.33
<b>T + F + H</b>	5.08	0.32	0.00	10.22	0.000	11.91	2.65	0.26	0.39	0.35	0.01	0.45
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.15	0.44	0.00	12.53	0.000	17.20	3.50	0.41	0.36	0.30	0.01	0.48
<b>T + L + F</b>	4.83	0.38	0.00	37.85	0.000	7.80	11.25	0.72	0.33	0.40	0.01	0.30
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.83	0.43	0.00	47.05	0.000	11.54	24.20	0.94	0.33	0.50	0.02	0.42
<b>T + L + F + H</b>	5.03	0.54	0.00	33.57	0.000	20.11	7.35	0.56	0.50	0.40	0.01	0.42
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.10	0.46	0.00	29.45	0.000	12.34	8.80	0.56	0.35	0.30	0.01	0.45

Table 14.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 13/02 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	4.47	0.76	0.00	30.04	0.000	3.17	2.70	0.66	0.76	0.85	0.03	0.44
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.66	0.46	0.00	23.37	0.000	5.02	3.00	0.46	0.58	0.40	0.01	0.41
<b>T</b>	4.79	0.54	0.00	15.27	0.000	3.04	1.45	0.31	0.60	0.50	0.02	0.38
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.67	0.38	0.00	21.80	0.000	3.73	2.30	0.49	0.60	0.50	0.02	0.51
<b>T + H</b>	5.10	0.51	0.00	8.19	0.000	3.40	0.85	0.13	0.55	0.39	0.01	0.27
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.21	0.70	0.01	13.52	0.000	5.80	1.20	0.11	0.60	0.40	0.01	0.37
<b>T + L</b>	4.99	0.36	0.00	18.41	0.000	3.77	6.80	0.30	0.22	0.35	0.01	0.27
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.01	0.90	0.00	15.09	0.000	2.75	6.70	0.25	0.77	0.80	0.03	0.23
<b>T + L + H</b>	5.26	0.66	0.00	12.10	0.000	4.02	3.00	0.17	0.55	0.38	0.01	0.39
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.16	0.57	0.00	27.12	0.000	5.86	5.20	0.34	0.50	0.50	0.02	0.33
<b>T + F</b>	5.04	0.32	0.00	27.08	0.000	11.11	5.95	0.70	0.40	0.35	0.01	0.30
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.95	0.66	0.00	30.75	0.000	17.87	5.00	0.50	0.71	0.70	0.02	0.39
<b>T + F + H</b>	5.04	0.54	0.00	18.74	0.000	13.26	2.95	0.38	0.30	0.28	0.01	0.44
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.04	0.92	0.00	13.32	0.000	10.99	3.10	0.36	0.93	0.80	0.03	0.47
<b>T + L + F</b>	4.95	0.58	0.00	24.65	0.000	5.44	8.30	0.50	0.34	0.44	0.02	0.89
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.98	0.52	0.00	38.92	0.000	8.68	18.50	0.84	0.14	0.40	0.01	0.88
<b>T + L + F + H</b>	5.04	0.69	0.00	33.23	0.000	14.97	7.95	0.68	0.48	0.42	0.01	0.75
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.11	0.61	0.00	40.72	0.000	13.75	12.60	0.88	0.35	0.30	0.01	0.77

Table 15.- Physico-chemical composition of leachates at the end of 20/02 week. The concentration of cations and anions is represented in mmol kg<sup>-1</sup>.

TREATMENTS	pH	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si <sup>+4</sup>	Al <sup>+3</sup>
<b>Ctrl</b>	4.48	0.61	0.00	21.50	0.000	2.34	2.90	0.54	0.52	0.57	0.02	0.69
<b>Ctrl</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.57	0.38	0.00	20.32	0.000	2.87	3.80	0.64	0.33	0.30	0.01	0.72
<b>T</b>	4.59	0.43	0.00	26.06	0.000	3.76	2.60	0.62	0.66	0.55	0.02	1.19
<b>T</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.60	0.33	0.00	17.72	0.000	3.69	2.60	0.42	0.43	0.40	0.01	0.98
<b>T + H</b>	4.84	0.62	0.03	21.21	0.000	4.32	1.15	0.33	0.59	0.55	0.02	0.57
<b>T + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.15	0.67	0.02	17.68	0.000	5.11	0.80	0.15	0.53	0.40	0.01	0.68
<b>T + L</b>	4.96	0.43	0.00	21.40	0.000	4.35	7.90	0.38	0.26	0.41	0.01	0.30
<b>T + L</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.03	0.44	0.00	25.17	0.000	3.49	10.90	0.40	0.16	0.40	0.01	0.30
<b>T + L + H</b>	5.17	0.56	0.00	24.15	0.000	4.87	4.70	0.31	0.50	0.44	0.02	0.47
<b>T + L + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.14	0.62	0.00	30.32	0.000	7.05	6.80	0.40	0.77	0.60	0.02	0.32
<b>T + F</b>	4.87	0.54	0.00	49.73	0.000	11.58	11.30	1.38	0.41	0.45	0.02	0.73
<b>T + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.69	1.69	0.00	108.89	0.000	24.23	17.20	2.00	0.97	1.50	0.05	0.70
<b>T + F + H</b>	4.86	0.66	0.00	44.09	0.000	16.20	5.70	0.98	0.56	0.53	0.02	0.51
<b>T + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.04	0.51	0.00	27.32	0.000	14.06	7.80	0.78	0.29	0.30	0.01	0.52
<b>T + L + F</b>	4.98	0.43	0.00	41.61	0.000	8.24	15.15	0.90	0.24	0.41	0.01	0.29
<b>T + L + F</b> <sub>(duplicate)</sub>	4.88	0.71	0.00	83.70	0.000	12.13	43.80	1.80	0.14	0.60	0.02	0.45
<b>T + L + F + H</b>	4.99	1.10	0.00	60.51	0.000	15.78	15.10	1.32	0.59	0.60	0.02	0.50
<b>T + L + F + H</b> <sub>(duplicate)</sub>	5.06	0.54	0.00	35.67	0.000	12.77	12.80	0.88	0.25	0.30	0.01	0.52

## Chapter 6

---

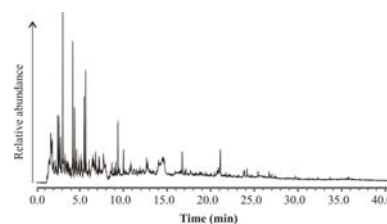
### *NaOH-extractable Organic Matter of Andic Soils from Galicia (NW Spain) Under Different Land Use Regimes: A Pyrolysis GC/MS Study*

*This chapter has been published in:  
European Journal of Soil Science 59:1096 – 1110  
(2008)*





# Chapter 6



Pyrolysis GC/Ms

## NaOH-extractable organic matter of andic soils from Galicia (NW Spain) under different land use regimes: A Pyrolysis GC/MS study

---

### Summary

The objective of this study was to determine to what extent the attenuation or loss of andic soil properties caused by land use change - from forest (FOR, average C content  $118.2 \pm 23.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) to agricultural (AGR, average C content  $55.7 \pm 16.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) use - is reflected in soil organic matter (SOM) at the molecular level. For this, NaOH-extractable SOM of A horizons from seventeen soils developed on amphibolitic parent material in NW Spain was studied by pyrolysis gas chromatography spectrometry (Py-GC/MS). We also included two buried andic A horizons (PAL, 2200 cal BP in age) on the same parent material, as a reference of the molecular composition of SOM from soils without recent litter additions. Organic matter of PAL soils had a composition largely different from that of superficial soils (FOR and AGR), with an important relative contribution of microbial polysaccharides and N-compounds, and an absence of compounds that characterize fresh plant litter (e.g. lignins). In the superficial soils, the relative contribution of lignin derivative compounds was greater in AGR than in FOR soils. Differences were also observed in the relative contribution of aliphatic compounds, being FOR soils enriched in this type of components compared to AGR soils. The results indicated that land use change from FOR to AGR, which was accompanied by a decrease in total SOM, resulted in an enrichment in primary SOM. The smaller relative abundance of primary SOM derivatives in andic FOR soils indicates that these compounds were quickly degraded in Andisols.



## 1. Introduction

Andic soils – referred to here as Andisols and soils from other orders with andic subgroup (Soil Survey Staff, 2006) - are generally developed from pyroclastic material of volcanic origin, where the presence of easily weatherable minerals, together with its high porosity, allow the formation of allophanic compounds and/or stable organo-mineral complexes during early stages of pedogenesis. Andic soils can also form on basic (gabbros) (Macías *et al.*, 1978) and metabasic (amphibolites and granulites) rocks (García-Rodeja *et al.*, 1987), and even on basic schists (Camps Arbestain *et al.*, 2001), during the early stages of weathering, under humid temperate conditions and good drainage.

Organic matter of andic soils is highly stable, especially in those in which andic properties are fully displayed (Andisols), with a mean residence time that ranges between 5,000 and 30,000 years (Wada & Aomine, 1973; Torn *et al.*, 1997). This is attributed to the predominance of organo-mineral complexes and adsorption of organic ligands on short-range order compounds (Martin & Haider, 1986; Aran *et al.*, 2001), which protect soil organic matter (SOM) from microbial decomposition (Boudot *et al.*, 1989; Aran *et al.*, 2001). The presence of these amorphous constituents renders a typical highly stable granular microstructure, within which SOM is possibly preserved from microbial attack through physical protection (because of either inaccessibility and/or the existence of temporarily waterlogged conditions) (Buurman *et al.*, 2007; González-Pérez *et al.*, 2007). Recent studies suggest that stabilized SOM in Andisols is mainly composed of secondary products and that primary SOM is quickly decomposed (Buurman *et al.*, 2007; Nierop *et al.*, 2005; 2007). However, there is controversy on the mechanisms of stabilization and the composition of SOM at the molecular level. Naafs (2004) and Nierop *et al.* (2005) observed a relative abundance of chitin markers and a predominance of polysaccharide compounds in soils developed on volcanic tephra from Madeira and Azores Islands, whereas Nierop *et al.* (2007) and González-Pérez *et al.* (2007) detected a relative predominance of the lipidic fraction in similar soils from Ecuador and the Canary Islands. No relationship between SOM composition and mineralogy was found, although an effect of pH on the relative predominance of lipids was suggested (Nierop *et al.*, 2007). Nonetheless, many aspects of the mechanisms of SOM stabilization remain unsolved, and more research is needed particularly to consider the implications on soil C sequestration with respect to climate change.

The comparison of the molecular composition of SOM of andic soils with that of soils in which andic properties have been attenuated or even lost after a land use change, provides a good opportunity to contribute to this field of research. Several investigations have shown that changes in land use - from forest (FOR) to agricultural (AGR) use - and soil management (from conventional to modern agriculture) have a negative impact on andic properties (Parfitt *et al.*, 1997; Verde *et al.*, 2005), causing the destruction of Al-humus complexes and a decrease in SOM. In a previous study of non-volcanic Andisols after a change from FOR to AGR use we observed a more than 50% decrease in SOM with a concomitant decrease in Al extractable by CuCl<sub>2</sub>, Na-pyrophosphate, NH<sub>4</sub>-oxalate and NaOH (Verde *et al.*, 2005). However, we did not investigate the

changes in SOM composition at the molecular level and this information could be crucial to improve our understanding of SOM stabilization mechanisms.

Pyrolysis GC/MS is an analytical technique widely used for the study of complex mixtures of organic compounds such as SOM (Boon, 1989; Stanckiewicz *et al.*, 1998). Since the introduction of this technique as a tool for the study of the organic fraction of soils in the late 1960s and early 1970s (Wershaw & Bohner, 1969; Kimber & Searle, 1970a,b), the method has been used to characterize composition and structure of the SOM of a wide variety of soil types (Schnitzer & Schulten 1989; Kögel-Knabner *et al.*, 1992; González-Vila *et al.*, 2001; McGrath *et al.*, 2003; Naafs *et al.*, 2005; Otto & Simpson, 2006; Telysheva *et al.*, 2007). However, the application of this technique to the characterisation of soils with andic properties has been very recent (Nierop *et al.*, 2005; Naafs *et al.*, 2005; Nierop *et al.*, 2007; González-Pérez *et al.*, 2007; Buurman & Nierop, 2007; Buurman *et al.*, 2007).

Thus, the objectives of this study were (i) to characterize by Py-GC/MS the molecular composition of SOM of soils developed on the same parent material (including two buried soils) and showing a transition from andic to non-andic properties resulting from land use changes, (ii) to relate SOM composition with the physico-chemical properties determined in the same soils in previous work (Verde *et al.*, 2005) with the aim of (iii) testing the validity of the hypothesis of SOM stabilization by organo-mineral complexes and short-range order compounds.

## 2. Material and Methods

### 2.1. - Description of Sampling Sites

We selected four areas (Gamas, Ardillero, Cubelo, and Arins) in an amphibolitic massif located in the vicinity of Santiago de Compostela (NW Spain). The topsoil (0-20 cm) of 17 representative soils (6 in Gamas, 4 in Ardillero, 4 in Cubelo and 3 in Arins) of FOR and AGR use were sampled during the summer of 1999 (Table 1). Within each area, the FOR and AGR soils were at distances less than 2 km apart, and the areas were less than 4 km apart. The soils represent a gradient of historical human influence, from higher to lower intensity: Arins > Cubelo > Ardillero = Gamas, which is translated into the loss of andic properties (Table 2) as the intensity increases (Verde *et al.*, 2005).

The buried soils (PAL, 2200 cal BP in age) are located within the same amphibolitic massif, at Monte Gaias, some 6 km from Gamas. They were sampled in 2001 in a recently opened trench through a man-made terrace dating from 1500 cal BP (Criado & Ballesteros, 2002). The process of terrace construction, carried out to solve the problem of excessive slopes, consisted of excavating the upslope part and moving it downslope where it is contained by a wall. The old surface soil (paleosol) is therefore covered by a varying thickness of terrace material (between 0.5 and 2 m). The buried A horizons were sectioned into samples of 5 cm thickness.

Table 1. Site coordinates and history of land-use regime in time

Area	S.I.*	Altitude /m	UTM Coordinates	Land use				Decade of transformation <sup>a</sup>
				1956	1994	1997	1999	
Gamas	3-go	294	29T 542134 4744014	Slash and burn AGR <sup>b</sup>	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	
	2-go	345	29T 542314 4744572	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	
	1-go	346	29T 543271 4744472	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	
	5-m	286	29T 542905 4743847	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation (maize)	1990s
	4-gr	287	29T 542915 4743856	Slash and burn AGR	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Shrubs ( <i>Ulex europaeus</i> )	Arable rotation (forage)	1990s
	7-w	319	29T 543202 4743817	Slash and burn AGR	Eucalyptus forest	Eucalyptus forest	Arable rotation (wheat)	1990s
Ardillero	11-ch	245	29T 545052 4742030	Slash and burn AGR	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	
	8-gr	276	29T 545711 4742241	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (forage)	1970s
	9-gr	250	29T 545564 4742590	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (forage)	1970s
	10-m	230	29T 545391 4742905	Slash and burn AGR	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation (maize)	1970s
Cubelo	12-pi	322	29T 544620 4745893	Slash and burn AGR	Pine forest	Pine forest	Pine forest	
	15-ok	294	29T 544844 4745332	Slash and burn AGR	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	
	13-m	296	29T 544799 4745495	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (maize)	1960s
	14-gr	270	29T 544768 4744828	Slash and burn AGR	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (forage)	1960s
	18-ch	318	29T 542191 4745291	Arable rotation	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	Mixed deciduous forest	1950s
	16-m	210	29T 540561 4745853	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (maize)	1950s
	17-gr	196	29T 541089 4745614	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation	Arable rotation (forage)	1950s
Arins								

<sup>a</sup> Approximate decade of transformation from either traditional AGR (slash and burn AGR) or FOR land use to modern AGR land use, identified by aerial photographs and interviews with local farmers.

<sup>b</sup> Slash and burn AGR consisted of the harvesting of shrubs (*Ulex europaeus* L.), which were burned, and the ashes then spread on the land. The land was then used for cereal cropping, generally rye, for short periods (5–10 years). Thereafter, the land was abandoned and naturally occurring vegetation left to grow for long periods (>20–30 years) so that soil fertility could recuperate.

\* S.I.: Site Identification.



Mean annual air temperature in Santiago de Compostela is 12.3 °C and the annual precipitation is 1624 mm. The type of vegetation and the change in land use of each sampling location are indicated in Table 1 and some relevant soil properties in Table 2. More detailed information about crop rotations and forage crops, as well as a thorough description of soil characteristics of the FOR and AGR soils can be found elsewhere (Verde *et al.*, 2005). All samples were air-dried and passed through a 2-mm sieve prior to analysis.

Table 2. Values of several properties of the soils studied.

	S. I. <sup>†</sup>	Org C	C:N	pH <sub>H2O</sub>	Al <sub>Cu</sub>	Al <sub>p</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>p</sub>	Fe <sub>o</sub>
		/g kg <sup>-1</sup>	/g g <sup>-1</sup>		/g kg <sup>-1</sup>				
Gamas	3-go	134.4	11.1	5.02	4.57	12.8	21.2	3.8	6.7
	2-go	112.3	8.5	5.16	3.63	9.9	18.3	3.0	6.0
	1-go	102.1	11.3	4.76	3.85	11.0	15.6	4.3	5.5
	5-m	79.4	8.1	5.01	1.89	6.7	16.2	4.6	15.2
	4-gr	64.8	9.2	4.99	1.87	7.3	12.7	4.9	9.8
	7-w	62.0	8.9	4.74	1.92	6.5	11.9	3.0	6.9
Ardillero	11-ch	167.4	12.6	4.59	4.94	9.4	18.1	3.5	7.5
	8-gr	59.9	9.7	5.16	1.90	5.7	12.9	2.5	7.8
	9-gr	66.4	10.0	4.81	1.77	6.7	10.4	4.3	7.5
	10-m	70.4	7.8	5.37	1.37	4.4	11.0	4.7	13.0
Cubelo	12-pi	113.0	10.7	4.80	3.72	11.3	17.6	3.2	6.2
	15-ok	108.3	9.0	4.01	3.18	9.3	14.7	4.3	7.0
	13-m	56.6	8.9	5.00	1.24	4.9	8.7	4.6	8.8
	14-pr	34.7	9.9	4.28	1.04	3.1	3.5	4.0	7.3
Arins	18-ch	89.6	8.8	4.09	3.31	7.8	9.9	4.8	6.5
	16-m	39.0	8.1	4.93	0.87	2.9	4.3	3.3	7.8
	17-pr	23.6	7.9	5.16	0.30	0.8	1.8	2.5	8.0
Ciudad Cultura	P1	71.3	16.5	5.17	2.47	12.5	20.4	5.0	9.9
	P2	73.5	17.1	5.18	2.62	11.7	29.0	4.6	10.6
	P3	72.9	15.6	5.17	2.50	11.0	29.1	3.9	9.6
	P4	67.2	15.0	5.16	2.12	8.9	16.0	3.6	7.5
	P5	64.8	14.9	5.18	2.46	9.4	18.5	3.7	7.7
	P6	70.8	14.5	5.16	2.35	9.6	21.3	3.8	8.7
Mean FOR soils (n=7) <sup>a</sup>		118.2	10.3	4.63	3.89	10.2	16.5	3.8	7.2
Mean AGR soils (n=10) <sup>a</sup>		55.7	8.8	4.95	1.42	4.9	9.3	3.8	8.9
Mean PAL soils (n=6) <sup>a</sup>		67.6	14.8	5.17	2.31	9.3	18.6	3.7	8.0
Signif. level		** <sup>b</sup>	* <sup>b</sup>	*	**	**	**	n.s. <sup>c</sup>	*

<sup>a</sup> For 0-20 cm depth.

<sup>b</sup> \*, \*\* Difference between FOR and AGR mean significant at  $P < 0.05$  and  $< 0.01$ , respectively.

<sup>c</sup> n.s. Difference between FOR and AGR mean not significant at  $P < 0.05$ .

<sup>†</sup> Site Identification.

## 2.2. - Extraction and Purification of SOM

Fifty mL of 1 M NaOH were added to 5 g air-dried soil samples and the suspensions were shaken for 24 h under N<sub>2</sub> atmosphere to prevent oxidation. Thereafter, they were centrifuged at 1800 g during 1 h and decanted. The solid residue obtained after decantation was extracted again with 50 mL 1 M NaOH for 24 h under N<sub>2</sub> atmosphere. The two extracts of each sample were mixed, and the solid residues comprising humin and undecomposed plant detritus were discarded. The extracts obtained were acidified to pH 1 with concentrated HCl to protonate SOM; 1 mL of concentrated HF was also added to eliminate silicates and increase the relative content of organic C (Schnitzer & Khan, 1972). The acid mixture was shaken for 48 h and after that dialyzed against distilled water using dialysis membranes with a pore size that ranged between 6000 and 8000 Da to eliminate the excess of salt. Finally, the solutions were freeze-dried prior to analysis.

## 2.3. - Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Py-GC/MS)

Approximately 0.5 g of purified SOM was pyrolysed using a Double-shot pyrolyser PY2020iD (Frontier Lab Ltd., Fukushima, Japan), directly connected to a GC/MS Agilent 6890 system, equipped with a fused silica column HP 5MS (length 30 m, internal diameter 250 µm, film thickness 0.25 µm). The column was coupled to an Agilent 5973 mass detector (mass range  $m/z$  45 – 550; ionization energy 70 eV). Helium was used as carrier gas. The oven was initially kept at 50 °C for 1 min, then heated at a rate of 6 °C min<sup>-1</sup> to 300 °C, and maintained at that temperature for 10 min. A final temperature of 500 °C was reached at a rate of 20 °C min<sup>-1</sup>, maintaining the temperature constant for 1 min. The identification of the compounds was made by using their mass spectra from two libraries (NIST and Wiley libraries) or by comparison with literature data (GC retention times and spectra). For the quantification process, the value of the peak area of each of the identified components relative to the total sum of areas within each pyrogram was calculated (the total TIC was not used). Therefore, the semi-quantitative nature of this analysis it should be noted and that the quantification made is only valid for the pyrolysed fraction of SOM most relevant to GC and may not be representative of the whole SOM. Reproducibility of pyrolysis-GC/MS analyses in andic soils was evaluated by Buurman & Nierop (2007) and found to be good.

## 2.4. - Statistical Analysis

Given the large number of pyrolysis products identified (106), we applied a multivariate statistical approach to the data set. The analysis was made in two steps. First, we performed a hierarchical cluster analysis (HCA) to group the individual compounds of each class of biocomponents (aliphatics, lipids, aromatics, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), lignins, polysaccharides, etc) into homogeneous groups. HCA data were standardized using Z scores ( $Z_i = (x_i - M)/SD$ ; where  $x_i$  is the percentage of compound  $x$  in sample  $i$ ,  $M$  is the mean value of  $x$  in the total population and  $SD$  is the standard deviation of the mean) to avoid the scale effect resulting from the large differences in the relative abundances of the detected compounds (0.05 to 30.6%). Square Euclidean distance was used for the grouping. Relative abundances of compounds of each class

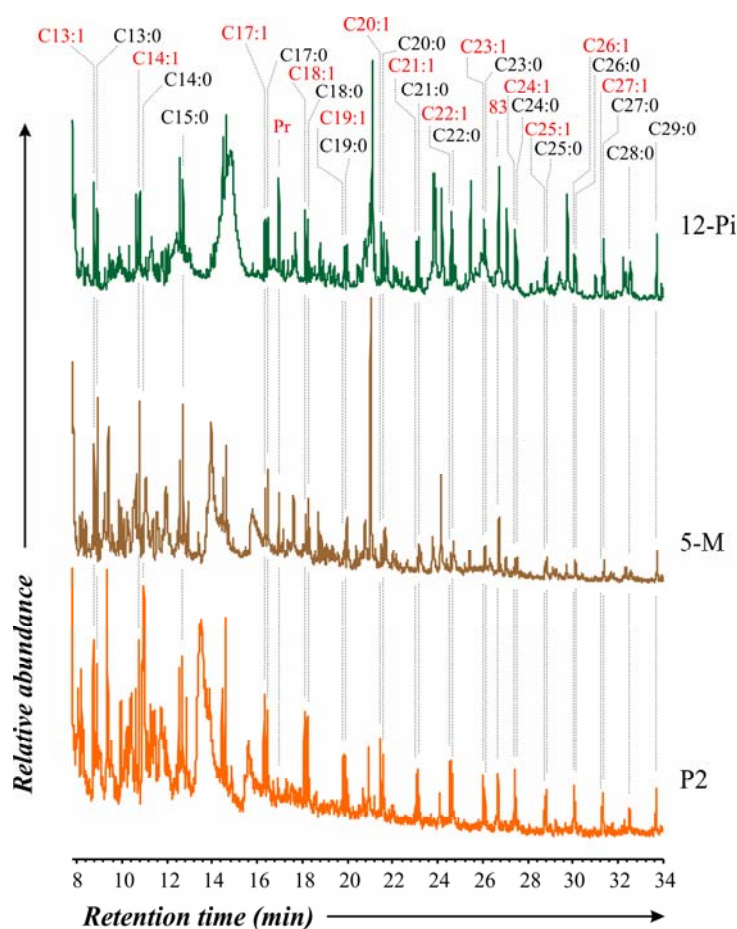
that grouped together (i.e. showing the same distribution in the soils population) were summed into a new class. Secondly, in the new reduced data set we undertook factor analysis by principal components (PCA). This approach revealed the underlying relationships among the biocomponents, and allowed us to identify the main trends characterizing the nature of the SOM of the soils and to relate them to the land use type.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. - Main Pyrolysis Products

##### 3.1.1. -Aliphatics

The ranges of the relative contribution of *n*-alkanes and *n*-alkenes (Figure 1) in all studied soils are reported in Table 3. Thirty three aliphatic compounds were identified with chain lengths that ranged between C<sub>13</sub> and C<sub>31</sub>; sixteen corresponding to *n*-alkenes (Cx:1) and seventeen to *n*-alkanes (Cx:0) (Table 3). Although

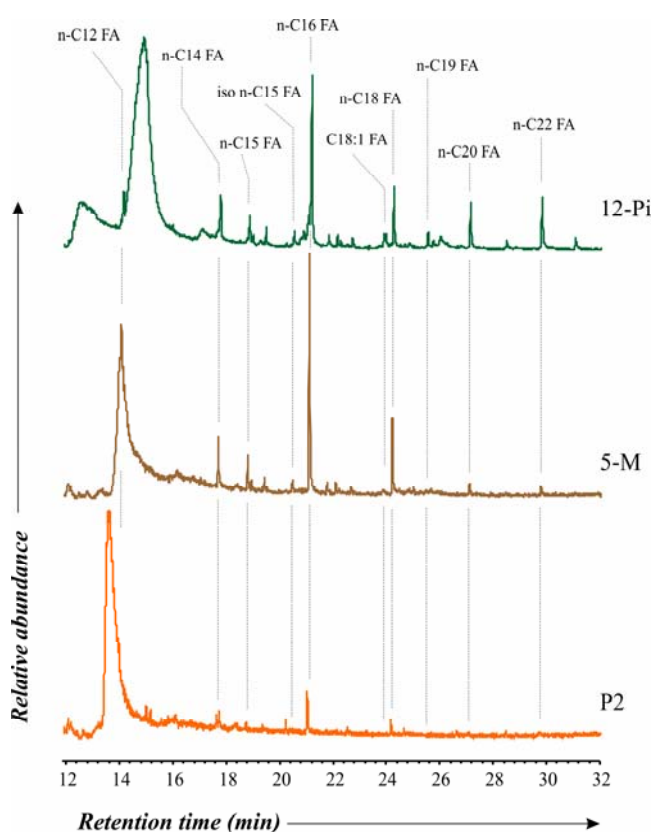


**Figure 1.** Partial pyrograms of *n*-alkanes and *n*-alkenes of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

this group had the largest number of compounds identified in the extracted SOM, its relative abundance was small; the average abundance for individual compounds was  $< 0.14\%$ , while the average sum of aliphatics was  $< 2.5\%$  (Table 3). It should be noted that the presence of *n*-alkyl ( $\text{CH}_2$ ) groups in plant tissues may reach up to 30 – 40 % of their total organic C content, and are mainly found in the cuticle (Hatcher & Spiker, 1988; Tegelaar *et al.*, 1989; Hempfling & Schulten, 1989) as primary components of cutin, which displays a C chain that ranges between  $\text{C}_{14}$  to  $\text{C}_{18}$  (Holloway, 1983), while in roots they are main components of suberin.

Despite the high number of *n*-alkanes and alkenes, no significant differences in contents or mean chain length ( $P < 0.05$ ) were found between the buried (PAL) and superficial horizons (FOR and AGR). Moreover, there were no significant differences ( $P < 0.05$ ) among horizons under FOR with a coverage of shrub (gorse: 1-go, 2-go, and 3-go) and woodland (pine: 12-pi; chestnut: 11-ch, 18-ch; oak: 15-ok) and among them and AGR horizons (maize: 5-m, 10-m, 13-m, 16-m; grassland: 4-gr, 8-gr, 9-gr, 14-gr, 17-gr; wheat: 7-w).

### 3.1.2. - Fatty acids



**Figure 2.** Partial pyrograms of fatty acids products of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

We identified ten fatty acids (Figure 2) in the soils studied. The ranges of the relative contribution of each compound are reported in Table 3. Fatty acids are the most abundant lipids in soils (Weete, 1976) and, as it is the case for aliphatics, their origin can be estimated from their chain length (Schnitzer *et al.*, 1986): (i) lengths between  $\text{n-C}_{4:0}$  and  $\text{n-C}_{26:0}$  are predominantly from microbial degradation, although those with lengths

between C<sub>16</sub> and C<sub>22</sub> are abundant in plants (Gupta *et al.*, 2007), and (ii) those with longer chains (n-C<sub>27:0</sub> and n-C<sub>38:0</sub>) of both plant and insect origin. The abundance of fatty acids in the studied soils was small (FOR: 2.0-5.1 %; AGR: 1.5-5.0 %), particularly in PAL soils (PAL: 0.3-0.9 %), indicating that these compounds were not preferentially preserved in the buried andic A horizons. It has been proposed that fatty acids may accumulate as a result of non-selective protection of SOM (Nierop *et al.*, 2005), after its inclusion in the supramolecular structure of the resistant SOM (Quénée *et al.*, 2006). However, this does not seem to be the case either in the present PAL or AGR soils.

### 3.1.3. -Lignins and Phenols

Identification of lignin-derived products (Table 3 and Figure 3) was based on Ralph & Hatfield (1991). We identified thirteen compounds with an average abundance of 0.03-3.76 %. Maximum total abundance of lignin-derivative products in FOR soils was 20.8 % and for AGR soils 20.4 %; they were almost absent in PAL soils (Table 3). The important relative contribution of lignin components in recent topsoils reflects the strong input of fresh litter (Lovato *et al.*, 2004).

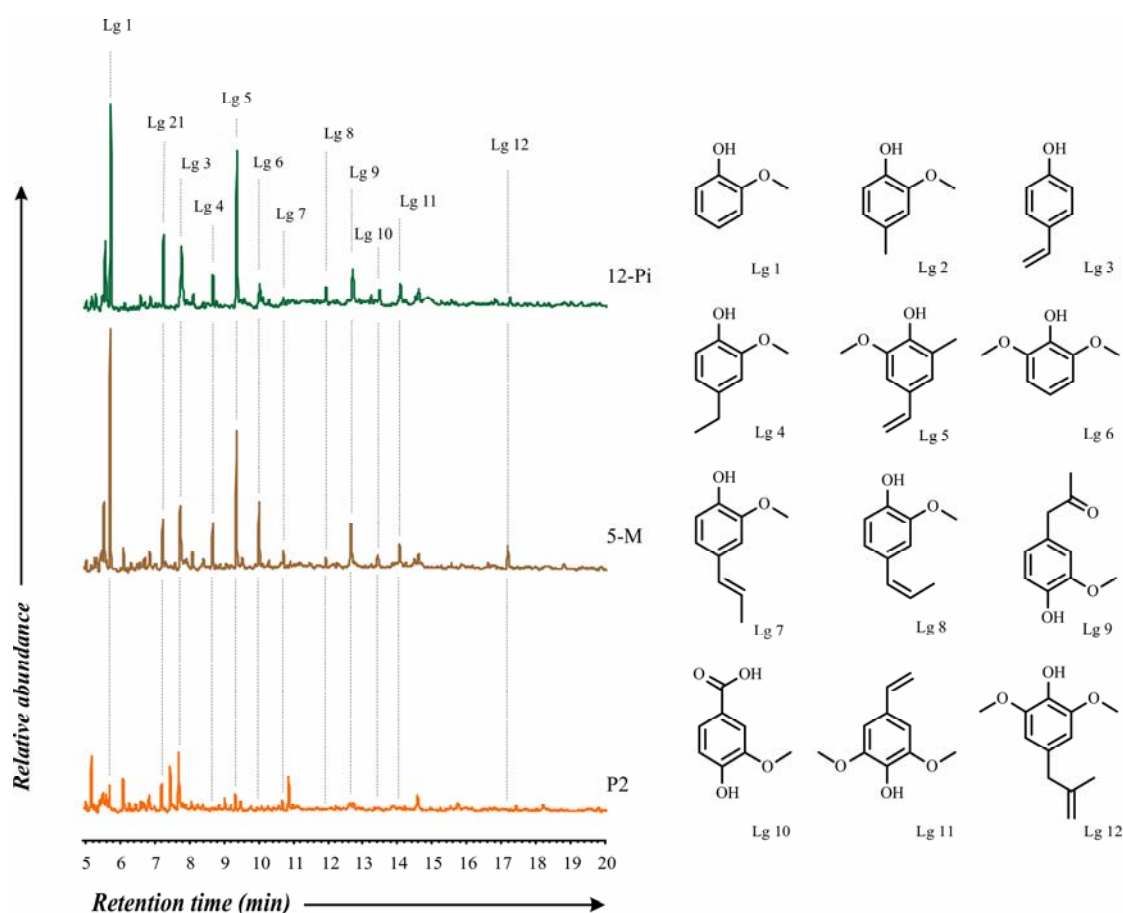


Figure 3. Partial pyrograms of lignin-derived products and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

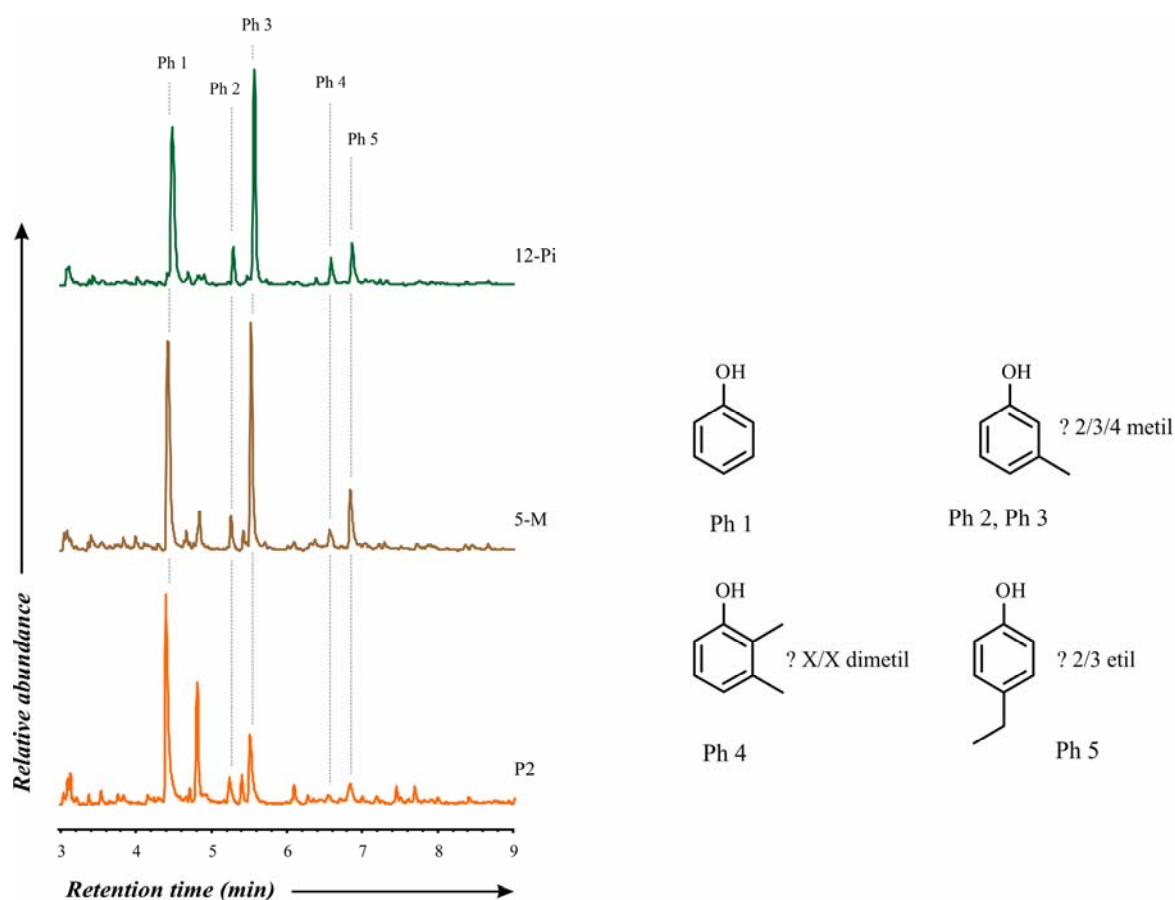


Figure 4 Partial pyrograms of phenol components and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

A total of five phenol components (Figure 4) were identified: phenol (Ph1) and four alkylphenols (Ph2-5) (Table 3). Despite the small number of components of this group, their relative contribution was large, and ranged from 5.7 to 14.7 % in FOR soils, from 7.5 to 17.9 % in AGR soils and from 2.4 to 5.8 % in PAL soils. These components were attributed to proteins (Galletti *et al.*, 1993) and to lignins and cellulose (Stuczynski *et al.*, 1997). The fact that the phenolic and the lignin-derivative components were both present in greater amounts in the actual topsoils (AGR and FOR soils), where the input of fresh material is larger, than in the buried (PAL) soils, where the input was nil, indicates that these two groups can be regarded as part of primary organic matter of soil and that these components are not greatly resistant to degradation.



## 3.1.4. - Polysaccharides

The polysaccharide group (Figure 5) was represented by seventeen compounds and had the largest abundance, with up to 82.5 % in PAL soils. The average abundance of individual compounds varies between 0.14 % (benzofuran, 7/2-methyl-) and 18.3 % (levoglucosan) (Table 3). Polysaccharides can be both plant-derived (primary), such as levoglucosan and levomannosan, which are pyrolysis products of intact polysaccharides such as cellulose (Poirier *et al.*, 2005), or microbial (secondary). Among the latter there are many furans, furaldehydes and furanones, which were especially abundant in the buried soils; these compounds have a high residence time (Gleixner *et al.*, 1999; van Bergen *et al.*, 1997) as a result of their recycling during the decomposition and humification of SOM (Gleixner *et al.*, 2002). This illustrates the importance of the microbial contribution in these soils, and suggests the existence of a protection mechanism. For Andisols on volcanic ash, Buurman *et al.* (2007) suggested occlusion of secondary SOM in allophanic microaggregates.

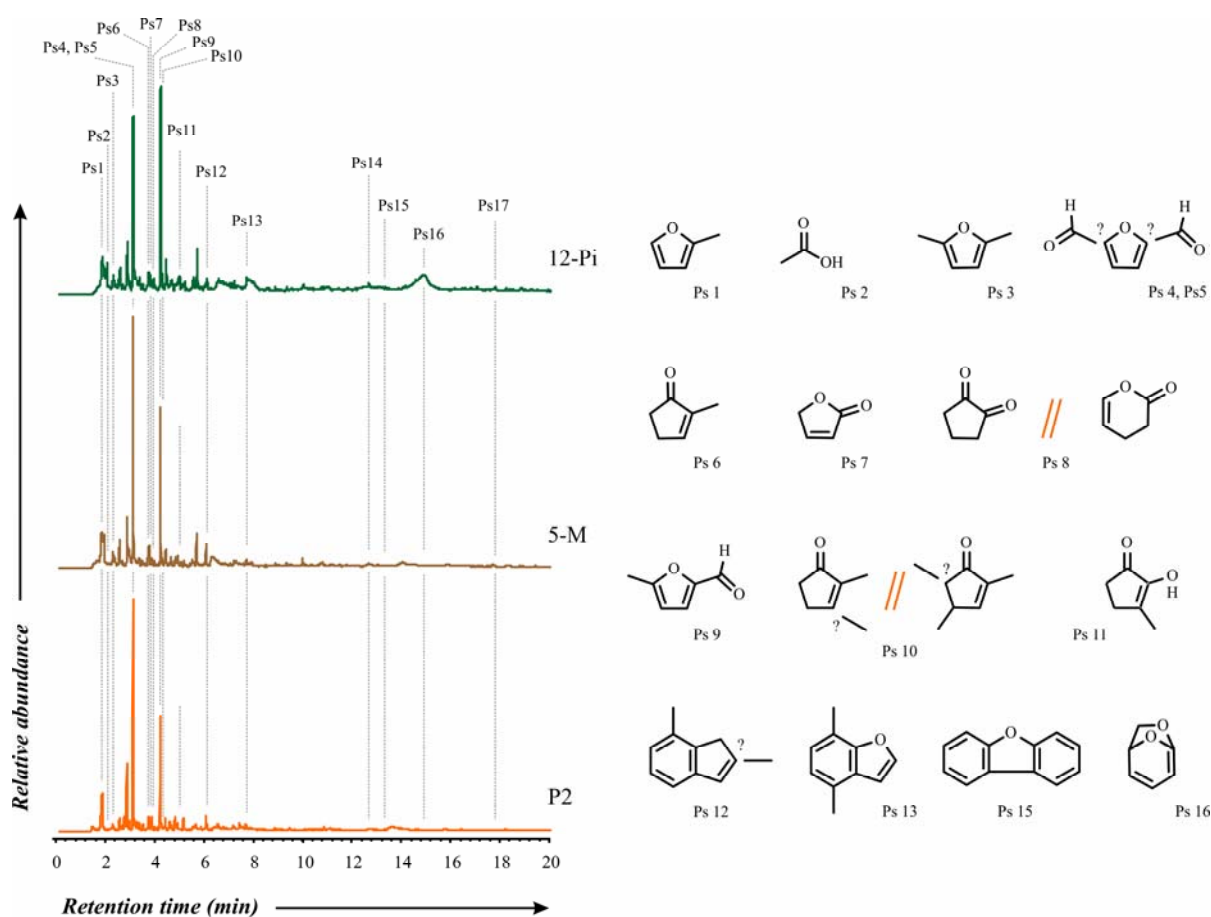


Figure 5. Partial pyrograms of polysaccharide group and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

**Table 3.** List of identified main pyrolysis products, specific masses, retention time and relative contribution of each compound. Flags printed in bold characters represent the more important compounds in both F1F2 and F1F3 space of factor analysis, whereas the remaining fragments were represented in other spaces.

Components	Flag	M.W.	m/z	R.T.	Min.	Aver.	Max.	HCA Group
n-13:1 alkene	<b>13:1</b>	182	55+69	8.87	0.04	0.24	0.50	A-VII
n-C14 alkene	<b>14:1</b>	196	55+69	10.74	0.00	0.06	0.18	A-III
n-C17 alkene	<b>17:1</b>	212	55+69	16.46	0.01	0.07	0.18	A-VII
n-C18 alkene	<b>18:1</b>	252	55+69	18.22	0.01	0.11	0.33	A-II
n-C19 alkene	<b>19:1</b>	266	55+69	19.85	0.00	0.07	0.14	A-II
n-C20 alkene	<b>20:1</b>	280	55+69	21.59	0.00	0.08	0.21	A-II
n-C21 alkene	<b>21:1</b>	294	55+69	23.18	0.00	0.08	0.22	A-I
n-C22 alkene	<b>22:1</b>	308	55+69	24.68	0.01	0.09	0.28	A-II
n-C23 alkene	<b>23:1</b>	322	55+69	26.13	0.00	0.06	0.15	A-I
n-C24 alkene	<b>24:1</b>	336	55+69	27.52	0.00	0.05	0.21	A-II
n-C25 alkene	<b>25:1</b>	350	55+69	28.86	0.00	0.03	0.08	A-II
n-C26 alkene	<b>26:1</b>	364	55+69	30.14	0.00	0.03	0.10	A-II
n-C27 alkene	<b>27:1</b>	378	55+69	31.40	0.00	0.01	0.06	A-VII
n-C13 alkane	<b>13</b>	184	57+71	9.02	0.04	0.16	0.27	A-VIII
n-C14 alkane	<b>14</b>	198	57+71	10.93	0.00	0.11	0.41	A-III
n-C15 alkane	<b>15</b>	212	57+71	12.81	0.00	0.11	0.23	A-VI
n-C17 alkane	<b>17</b>	184	57+71	16.57	0.02	0.08	0.23	A-VIII
n-C18 alkane	<b>18</b>	254	57+71	18.34	0.01	0.08	0.19	A-II
n-C19 alkane	<b>19</b>	268	57+71	19.95	0.00	0.08	0.25	A-III
n-C20 alkane	<b>20</b>	282	57+71	21.69	0.01	0.06	0.14	A-I
n-C21 alkane	<b>21</b>	296	57+71	23.28	0.01	0.05	0.14	A-I
n-C22 alkane	<b>22</b>	310	57+71	24.76	0.01	0.06	0.15	A-II
n-C23 alkane	<b>23</b>	324	57+71	26.20	0.01	0.03	0.06	A-III
n-C24 alkane	<b>24</b>	338	57+71	27.59	0.00	0.03	0.08	A-II
n-C25 alkane	<b>25</b>	352	57+71	28.91	0.00	0.03	0.10	A-II
n-C26 alkane	<b>26</b>	366	57+71	30.20	0.00	0.02	0.05	A-II
n-C27 alkane	<b>27</b>	380	57+71	31.44	0.01	0.04	0.12	A-II
n-C28 alkane	<b>28</b>	394	57+71	32.61	0.00	0.01	0.05	A-II
n-C29 alkane	<b>29</b>	408	57+71	33.79	0.01	0.06	0.13	A-II
n-C30 alkane	<b>30</b>	422	57+71	34.91	0.00	0.01	0.05	A-IV
n-C31 alkane	<b>31</b>	436	57+71	36.02	0.00	0.07	0.19	A-II
branched alkene	<b>83</b>	280	83	26.80	0.00	0.14	0.46	A-I
Pris-1-ene	<b>Pr</b>	210	55+69	17.06	0.00	0.12	0.54	A-V
Toluene	<b>Aro1</b>	92	91+92	2.71	1.19	5.33	10.37	Ar-I

Table 3. Continuation

Components	Flag	M.W.	m/z	R.T.	Min.	Aver.	Max.	HCA Group
Ethylbenzene	Aro2	106	91+106	3.35	0.00	0.41	1.21	Ar-III
Styrene	Aro3	104	78+104	3.63	0.17	0.75	1.95	Ar-II
Benzene, 1-methyl-2-(1-ethylethyl)-	Aro4	134	119	4.92	0.00	0.12	2.72	Ar-II
1H-Indene, 1-methylene // naphthalene	Aro5	128	128	7.29	0.06	0.50	1.49	Ar-II
n-C12 FA	FA1	256	60+73	14.22	0.00	0.09	0.26	FA-III
n-C14 FA	FA2	256	60+73	17.78	0.00	0.15	0.31	FA-II
n-C15 FA	FA3	256	60+73	18.90	0.00	0.16	0.37	FA-IV
iso n-C15 FA	FA4	256	60+73	20.53	0.00	0.11	0.34	FA-I
n-C16 FA	FA5	256	60+73	21.20	0.12	1.32	2.72	FA-I
C18:1 FA	FA6	226	55+69	23.36	0.00	0.08	0.20	FA-I
n-C18 FA	FA7	298	60+73	24.29	0.07	0.45	1.19	FA-I
n-C19 FA	FA8	312	60+73	25.53	0.00	0.17	0.59	FA-I
n-C20 FA	FA9	324	60+73	27.13	0.00	0.14	0.60	FA-I
n-C22 FA	FA10	348	60+73	29.82	0.00	0.14	0.66	FA-I
Guaiacol	Lg1	124	109+124	5.74	0.00	3.76	9.68	Lg-II
4-methylguaiacol	Lg2	138	123+138	7.25	0.00	0.45	1.66	Lg-II
4-Vinylphenol	Lg3	120	91+120	7.75	0.00	1.10	4.69	Lg-II
4-ethylguaiacol	Lg4	152	137+152	8.68	0.00	0.27	0.80	Lg-II
4-vinylguaiacol	Lg5	150	135+150	9.38	0.00	2.04	4.72	Lg-II
Syringol	Lg6	154	139+154	10.04	0.00	0.84	2.33	Lg-II
cis-4-(1-propenyl)guaiacol	Lg7	164	77+164	10.10	0.00	0.02	0.26	Lg-I
trans-4-(1-propenyl)guaiacol	Lg8	164	77+164	11.95	0.00	0.16	0.98	Lg-II
4-acetylguaiacol	Lg9	166	151+166	12.67	0.00	0.54	2.15	Lg-II
Vanillic acid methyl ester	Lg10	182	151+182	13.26	0.00	0.03	0.12	Lg-II
4-vinylsyringol	Lg11	180	165+180	14.03	0.00	0.26	1.07	Lg-II
4-acetylsyringol	Lg12	196	181+196	17.19	0.00	0.23	0.66	Lg-II
Pyridine	N1	79	52+79	2.62	1.08	2.93	6.49	N-VIII
Pyridine, 2/3/4-Methyl-	N2	93	66+93	3.08	0.08	0.38	0.79	N-VII
1H-Pyrrole, 3/2-Methyl-	N3	82	80+81	3.22	0.07	0.27	0.56	N-V
Pyridine, 3/2/4-methyl-	N4	93	66+93	3.43	0.00	0.27	1.01	N-VIII
1H-Pyrrole, 2-ethyl- (dimethylpyrrole)	N5	95	80+95	3.87	0.00	0.04	0.27	N-II
Pyridine, x,x-dimethyl-	N6	107	106+107	4.01	0.00	0.30	0.67	N-VI
1H-Pyrrole-2-carboxaldehyde	N7	95	94+95	4.81	0.00	0.54	2.26	N-VIII
Acetylpyrrole	N8	109	94+109	5.42	0.00	0.21	0.36	N-VIII
Benzyl nitrile benzeneacetonitril	N9	117	90+117	6.48	0.23	0.45	0.93	N-VII

Table 3. Continuation

Components	Flag	M.W.	m/z	R.T.	Min.	Aver.	Max.	HCA Group
Picolinamide // Pyridine-2-carboxamida	<b>N10</b>	122	79+122	8.46	0.00	0.12	0.36	N-VIII
Indole	<b>N11</b>	117	90+117	9.14	0.15	0.52	1.00	N-IV
1H-Indole, 5/3/2/4-methyl-	<b>N12</b>	131	130+131	10.86	0.04	0.24	0.45	N-IV
3-Pyridinol, 6-methyl-	<b>N13</b>	109	80+109	10.89	0.00	0.30	1.64	N-VIII
1H-Isoindole-1,3(2H)-dione	<b>N14</b>	147	76+147	12.50	0.00	0.31	1.37	N-VIII
diketodipyrrole	<b>N15</b>	186	93+186	16.81	0.44	1.38	3.68	N-III
amide	<b>N16</b>	255	59+72	24.55	0.00	0.03	0.08	N-I
amide	<b>N17</b>	281	59+72	32.42	0.00	0.04	0.15	N-I
1H-Indene-1-one, 2,3-dihydro-	<b>PA1</b>	132	104+132	8.91	0.05	0.43	0.69	PA-I
Naphthalene, 1/2-methyl-	<b>PA2</b>	142	141+142	9.19	0.06	0.27	0.70	PA-II
Naphthalene, 1/2-methyl-	<b>PA3</b>	142	141+142	9.47	0.03	0.25	0.87	PA-II
Naphthalene, x,x-dimethyl-	<b>PA4</b>	156	141+156	11.54	0.00	0.10	0.96	PA-II
Naphthalene, x,x,x-trimethyl-	<b>PA5</b>	170	155+170	14.13	0.00	0.11	0.98	PA-II
Naphthalene, x,x,x-trimethyl-	<b>PA6</b>	170	155+170	14.62	0.00	0.13	0.96	PA-II
Phenol	<b>Ph1</b>	94	66+94	4.51	1.48	4.32	7.47	Ph-I
Phenol, 2/4/3-methyl-	<b>Ph2</b>	108	107+108	5.31	0.10	0.69	2.15	Ph-III
Phenol, 2/4/3-methyl-	<b>Ph3</b>	108	107+108	5.61	0.07	4.12	8.32	Ph-II
Phenol, x,x-dimethyl-	<b>Ph4</b>	122	107+122	6.61	0.00	0.40	1.10	Ph-II
Phenol, 4/3/2-ethyl-	<b>Ph5</b>	122	107+122	6.86	0.00	1.00	2.38	Ph-II
Furan, 2-Methyl-	<b>Ps1</b>	82	53+82	1.86	1.36	2.63	4.54	Ps-V
Acetic acid	<b>Ps2</b>	60	60	2.14	0.69	4.21	11.77	Ps-IV
Furan, 2,5-dimethyl-	<b>Ps3</b>	96	95+96	2.31	0.52	1.07	2.06	Ps-V
2-Furaldehyde	<b>Ps4</b>	96	95+96	3.10	0.15	1.32	20.23	Ps-V
3-Furaldehyde	<b>Ps5</b>	96	95+96	3.15	0.12	11.07	22.65	Ps-V
2-Cyclopentene-1-one, 2/3-methyl-	<b>Ps6</b>	96	67+96	3.71	0.06	0.19	0.95	Ps-III
2(5H)-Furanone	<b>Ps7</b>	84	55+84	3.84	0.08	0.53	2.16	Ps-V
1,2-Cyclopentanedione //	<b>Ps8</b>	98	55+98	3.88	0.00	0.64	2.83	Ps-V
2,3-dihydro-(2H)-pyran-2-one	<b>Ps9</b>	110	109+110	4.26	2.40	8.79	17.72	Ps-V
2-Furaldehyde, 5-methyl-	<b>Ps10</b>	96	95+96	4.27	0.00	0.30	5.77	Ps-V
2-cyclopentene-1-one, 2/3-methyl- // Furan, 2,4/5--dimethyl-	<b>Ps11</b>	112	55+112	5.05	0.09	0.85	1.88	Ps-V
2-Cyclopenten-1-one-, 2-hydroxy-3-methyl-	<b>Ps12</b>	132	131+132	6.01	0.05	0.23	0.79	Ps-V
Benzofuran, 7/2-methyl-	<b>Ps13</b>	146	145+146	7.73	0.00	0.14	0.86	Ps-III
Benzofuran, 4,7-dimethyl-	<b>Ps14</b>		60+73	12.67	2.81	7.12	13.31	Ps-IV
Levogalactosan								

Table 3. Continuation.

Components	Flag	M.W.	m/z	R.T.	Min.	Aver.	Max.	HCA Group
dibenzofuran	Ps15	168	139+168	13.36	0.00	0.07	0.21	Ps-V
Levomannosan	Ps16	162	60+73	15.35	8.73	18.31	30.63	Ps-I
Levoglucozan	Ps17		60+73	17.82	0.04	0.50	1.61	Ps-II

## 3.1.5. - N-Compounds

The seventeen compounds identified (Figure 6) all have low average relative abundances, ranging from 0.03 to 2.9 % (Table 3). The source of proteins and polypeptides from which these components are derived is difficult to identify as all living species contain these macromolecules, and thus are likely to be derived from them through transformation processes. However, the larger abundance of N-compounds in PAL soils, and the fact that the predominant N-compounds in these soils include those designated as microbial products in Andisols on volcanic ash (Buurman *et al.*, 2007), suggests a predominance of SOM of microbial origin. This is a logical combination with the high proportion of microbial sugars in PAL soils.

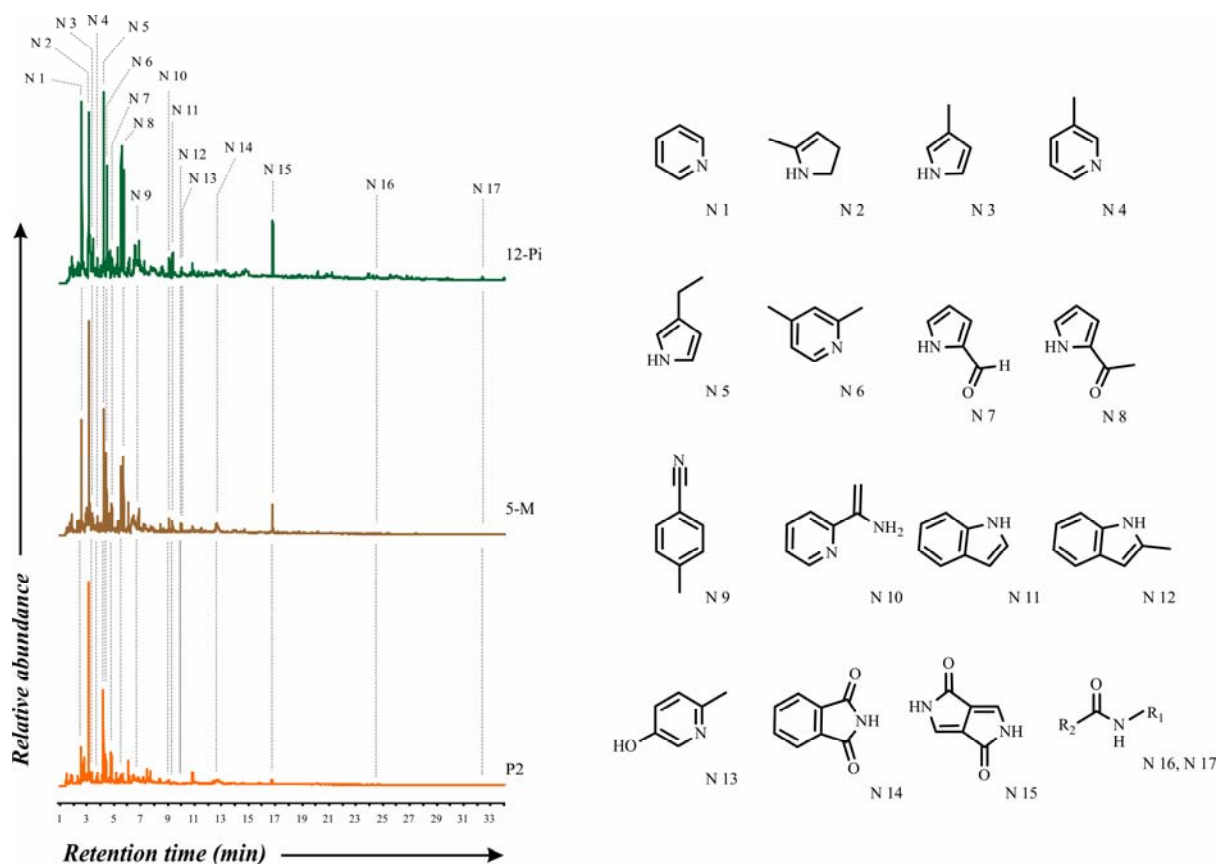


Figure 6. Partial pyrograms of N-compounds and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

## 3.1.6. - Aromatics and Polycyclic Aromatics

Both groups of compounds have a low relative contribution to the SOM of the studied soils (Table 3). The mean relative contributions of the aromatic components (Figure 7) ranged from 4.3 to 13.4 % in the FOR soils, from 5.2 to 9.0 % in the AGR soils, and from 1.9 to 7.7 % in the PAL soils. Aromatics are generally the pyrolysis products of proteins. The mean relative contributions of the polyaromatic components (Figure 8) ranged from 0.7 to 4.3 % in the FOR soils, from 0.3 to 1.4 % in the AGR soils, and from 0.6 to 1.4 % in the PAL soils. These molecules are generally considered to be products of incomplete combustion of biomass (Suess, 1976; Sims & Overcash, 1983; Nikolaou *et al.*, 1984), although they can also be associated with relicts of cyclisation processes of aliphatic compounds that occur during pyrolysis (Saíz-Jiménez & Leeuw, 1984), and even to neoformation under low O<sub>2</sub> availability conditions (Thiele & Brümmer, 2002). In soils without evidence of burning, PAHs - excepting naphthalene - are extremely scarce, which suggests that cyclisation is not a major process. The contribution of PAHs was ca 2 % in all samples, except for the 1-go sample in which they reached ca 5%. These compounds were generally more abundant in soils with higher organic C content (Table 2).

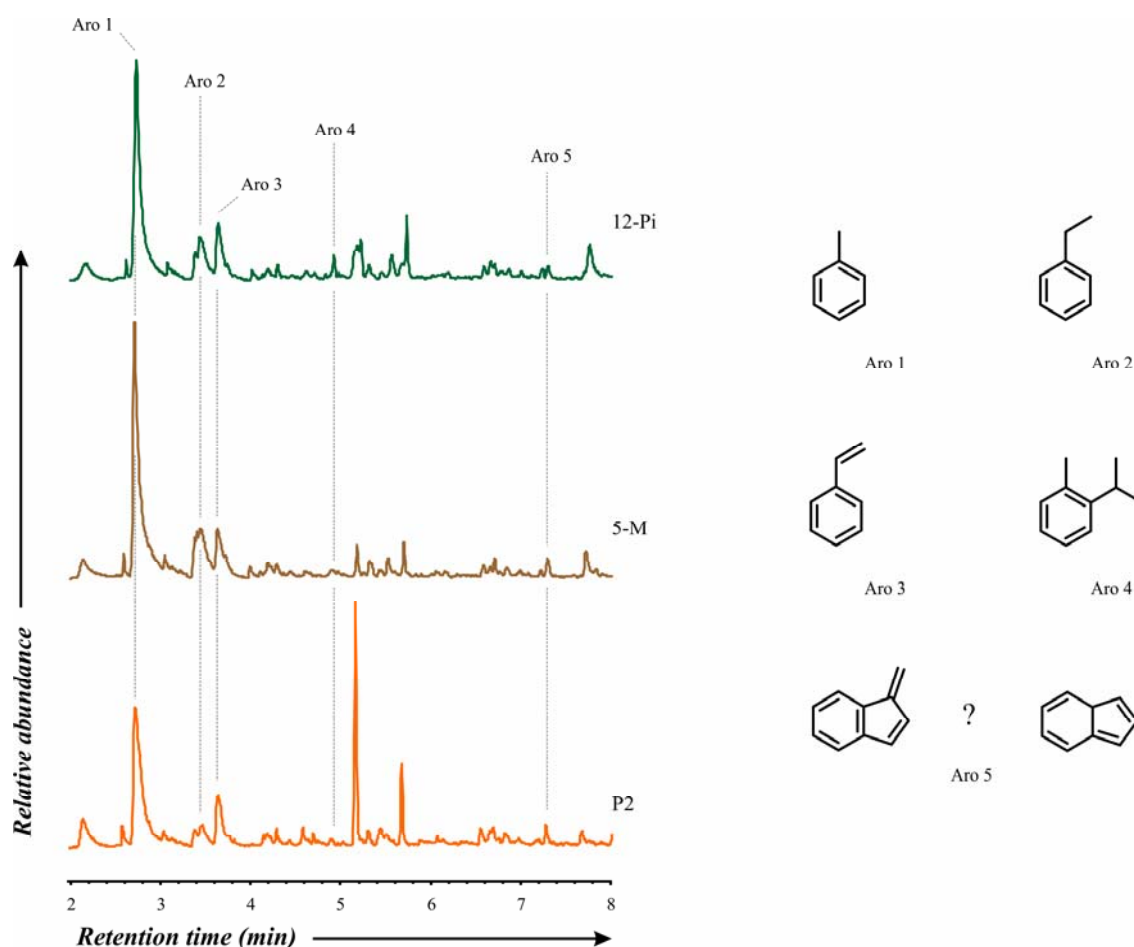


Figure 7. Partial pyrograms of aromatic components and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).



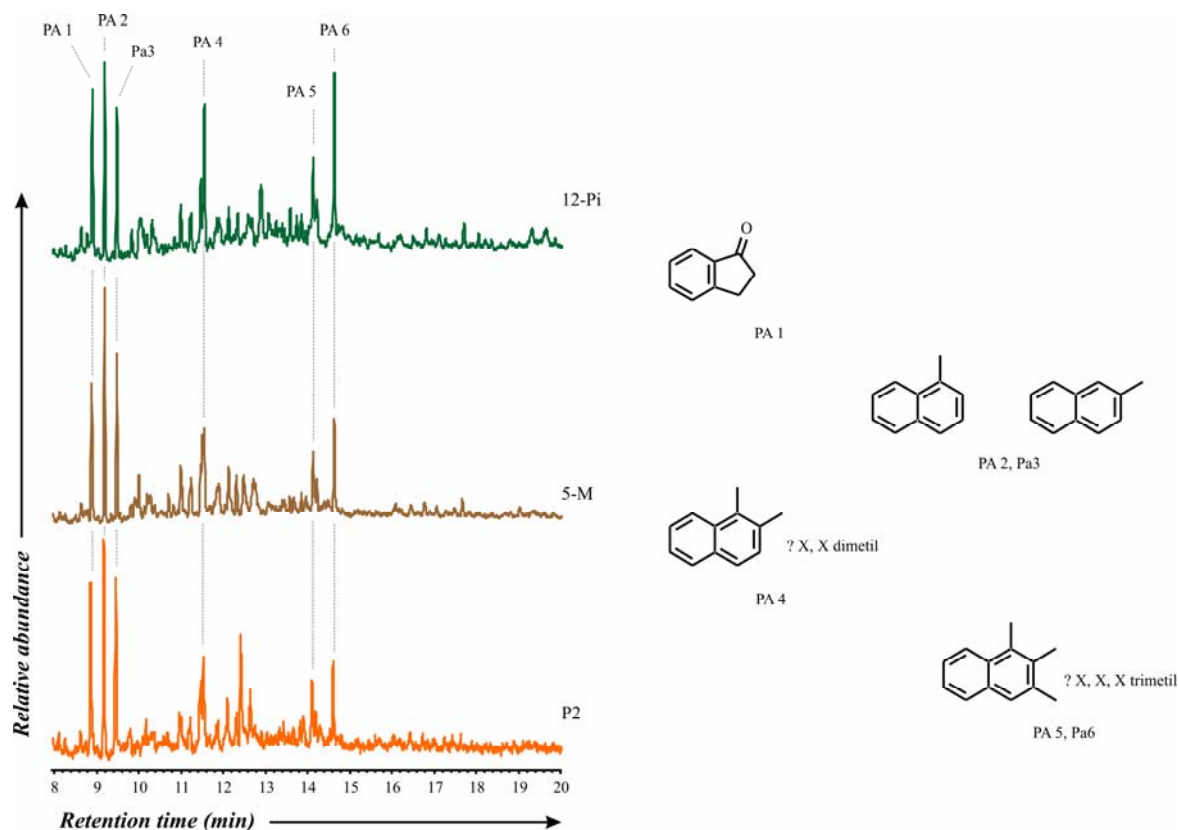


Figure 8. Partial pyrograms of polycyclic aromatic hydrocarbons components and their chemical structure of some selected samples: 12-Pi (forest use; *Pinus pinaster*); 5-M (agricultural use; corn crop); and P2 (buried soil).

### 3.2. - Factor Analysis

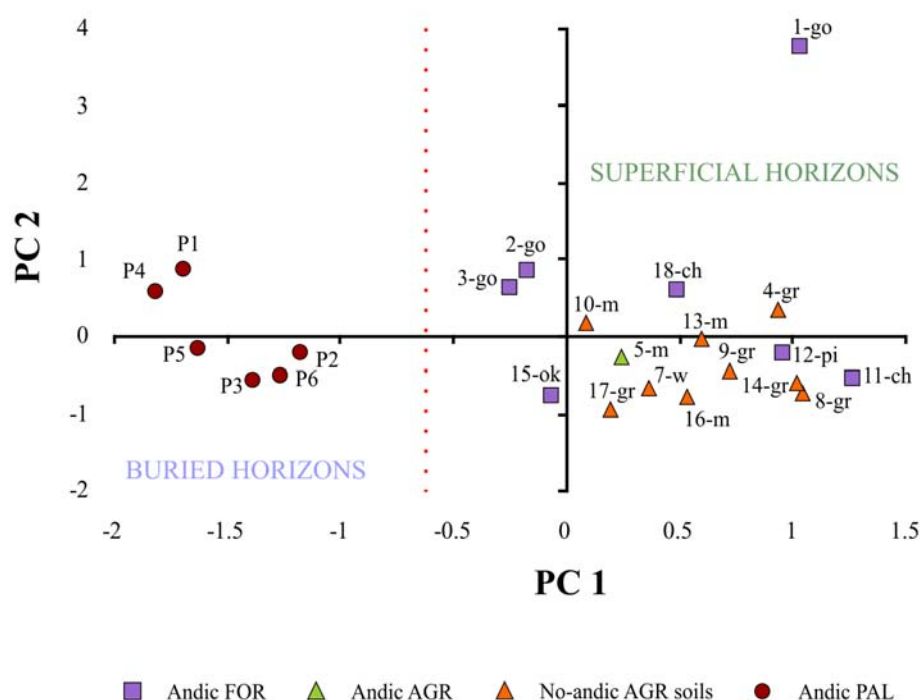
Prior to factor analysis we undertook an HCA to group compounds of the same class of biocomponents (aliphatics, fatty acids, lignins and phenols, polysaccharides, N-compounds, aromatics). Compounds of the same class that linked at very short distance in the HCA were summed into a new group. This was done because (i) more than half of the detected compounds were present in small proportions (<1%), (ii) large differences in values (i.e. orders of magnitude) among variables result in poor statistics and difficulties in interpretation, (iii) we deal with close data, because abundances are expressed as percentages, (iv) since the HCA was done using Z scores, the grouping is based on similarities in the distribution of each compound in the set of samples, not on the scales of its actual values and (v) the summation of closed linked compounds of the same class does not produce a significant loss of variance, since the new group will show the same distribution. This procedure resulted in a reduction from 106 to 35 final groups: 4 groups of fatty acids, 2 of phenols, 2 of lignins, 3 of aromatics, 7 of aliphatics, 2 of PAHs, 8 of N-compounds and 5 of polysaccharides (Table 3).

The factorial analysis was carried out for two groups of data: (i) the complete data set (FOR, AGR and PAL soils) and (ii) a reduced data set, from which the PAL soils were excluded, using in both cases the final 35 groups of components obtained from the HCA analysis.

## 3.2.1. - Complete Data Set

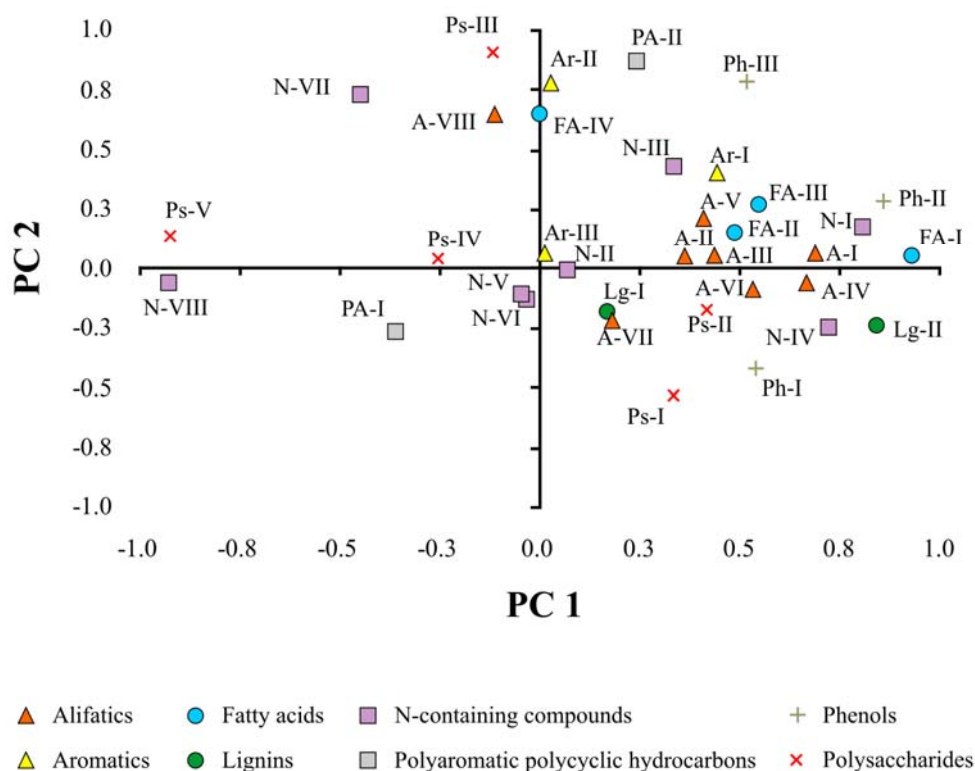
A total of nine factors were included in the analysis, which explained a total variance of 88.4 %. However, only the first three factors were considered, as they explained up to 55.5 % of the total variance (and the first two factors 41.9 % of the total variance). The rest of the variance, explained by the remaining factors, was mainly attributed to one or two groups of components, which in most cases responded to specific characteristics of individual soils. Thus, this variance was considered as residual and is not described further.

Figure 9 shows a plot of all samples in PC1-PC2 space. PC1 clearly separates all samples of buried horizons (PAL) from those of current topsoils (AGR and FOR). PC2 shows an incomplete separation of andic and non-andic samples within AGR and FOR soils. Figure 10 shows the distribution of compound groups underlying these separations. If we exclude groups of variables with low factor loadings (between -0.5 and +0.5 on both axes), two groups of components mark the negative section of PC1 in Figure 10. These are the Ps-V group, which contains mainly (microbial) furan components and the N-VIII group, which contains microbial N-compounds (Table 3). High loadings on the positive side of PC1 were found for most of the alkane+alkene groups, the lignin group Lg-II, the N-containing groups N-I and N-IV, all phenols (Ph-I, -II, -III), fatty acid groups (FA-I, -II, -III), and a group of levosugars (Ps-II). This shows that PC1 mainly separates primary (plant-derived) SOM, with positive loadings, from microbial SOM, with negative loadings.



**Figure 9.** Factor scores on PC1-PC2 projection of the complete data set. Filled symbols represent soils with andic properties. The dotted line separates buried (circles: PAL soils) and actual surface horizons (squares: FOR soils; triangles: AGR soils).

On PC2, positive loadings were found for a small group of sugar compounds (Ps-III), some aromatics (Ar-II) and polyaromatics (PA-II), N-compounds (N-VII) some alkanes and alkenes (A-VIII), 2-methylphenol (Ph-III) and the C<sub>15</sub> fatty acid (FA-IV). The only group with a significant negative score was that of the levosugars (Ps-I). This distribution suggests that positive loadings on PC2 signify the influence of charring (PA) and higher N contents associated with non-microbial SOM as opposed to relatively undegraded cellulosic material (negative loadings).



**Figure 10.** Factor loadings corresponding to the PC1-PC2 space of the complete data set. Explained variance for each factor, PC1 and PC2, was 26.1 and 15.8 %, respectively.

The combination of Figures 9 and 10 indicates that (i) the buried soils, which do not have replenishment by fresh litter, have lost a considerable amount of primary (plant-derived) SOM, (ii) these losses include components that are generally considered to be fairly stable such as alkanes/alkenes, fatty acids and lignins and (iii) the decay of primary SOM resulted in a considerable accumulation of secondary (microbial) SOM. Because differences between the topsoils (AGR and FOR soils) are, in these figures, attenuated by the major difference with the buried soils, differences between the superficial soils have been analyzed in a separate data set.

### 3.2.2. - Recent Soils Alone (Reduced Data Set)

As in the previous section, a total of nine factors were included in the analysis, which explained a total variance of 89.2 %. Only the first three factors were considered, as they explained up to 55.7 % of the total variance (and the first two factors 43.5 % of the total variance). As in the previous PCA on the extended data set, the remaining variance, explained by the other factors, was mainly attributable to one or two groups of components, which in most cases responded to specific characteristics of one or two soils.

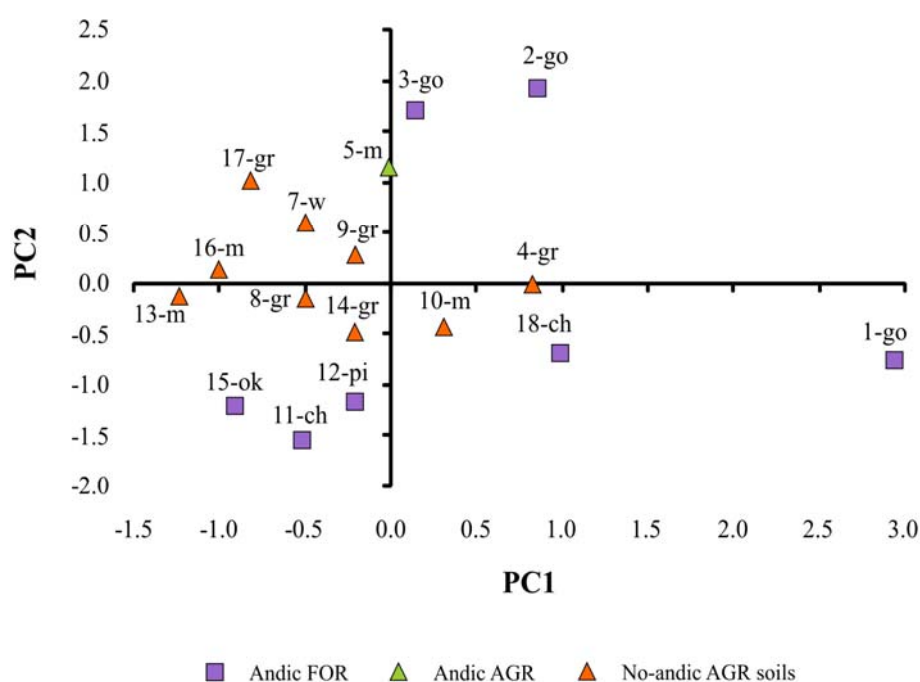


Figure 11. Plot of factor scores of recent topsoils in PC1-PC2 space (reduced data set).

Figure 11 shows the plot of recent soil samples in PC1-PC2 space. Those under primary tree forest and shrub vegetation (FOR soils), which correspond to those that have maintained their andic properties, are peripheral. There were wide differences in composition between all the recent top soil samples reflecting the differences in vegetation. Soils under gorse vegetation (1-go, 2-go and 3-go) had a different composition from soils under tree vegetation (11-ch, 12-pi, 15-ok, 18-ch). The 30-50 years under tree species has been sufficiently long to significantly change the chemical composition compared with that of soils under shrubs. There are three soils from continuous arable cultivation (AGR: 13-m, 16-m and 17-gr) that are most distant from the native vegetations while the other AGR soils are in intermediate positions. AGR soils from the most recently cleared fields (4-gr, 5-m, and 10-m) plot closest to the FOR samples, which reflects their history (Table 1). The 5-m soil was only recently cultivated, which may explain the andic characteristics of this AGR sample.

The distribution of the chemical groups (Figure 12) explains the causes of the differences between the samples. In the PC1-PC2 plot (Figure 12), the markers for fresh plant-derived material (levosugars, Ps-I; lignins, Lg-I, II; prist-1-ene, in A-IV) were found in the lower left quadrant. The clusters N-VIII and Ps-V, previously ascribed to microbial SOM, were found in the upper left and top, respectively, together with other N-compounds (N-IV, V, and VI) and aromatics (Ar-III). The indole cluster (N-IV) is related to fresh litter and therefore indicates litter rich in N-compounds. Because the two clusters of microbial components distribute at the extreme ends of the other two N-clusters and the Ar-III group, it is not possible to separate in this projection the effects of microbial decomposition and of N-fertilization. The N-VI group (dimethylpyridine) is ascribed to microbes that degrade lignin and other phenolic components (Bremner, 1967). However, this compound can also originate from the pyrolysis of  $\beta$ -alanine, polypeptides and chitin (Lien & Nawar, 1974; Martin *et al.*, 1979; van der Kaaden *et al.*, 1998). Finally, the far-right part on PC1 is determined by two N-clusters (N-III,-VII), aliphatics (A-VIII), aromatics (Ar-II), phenols (Ph-II,III), C<sub>15</sub> fatty acid (FA-IV) the larger cluster of char-derived polyaromatics (PA-II) and a small polysaccharide group (Ps-III), which contains benzofurans, also a marker of charred material.

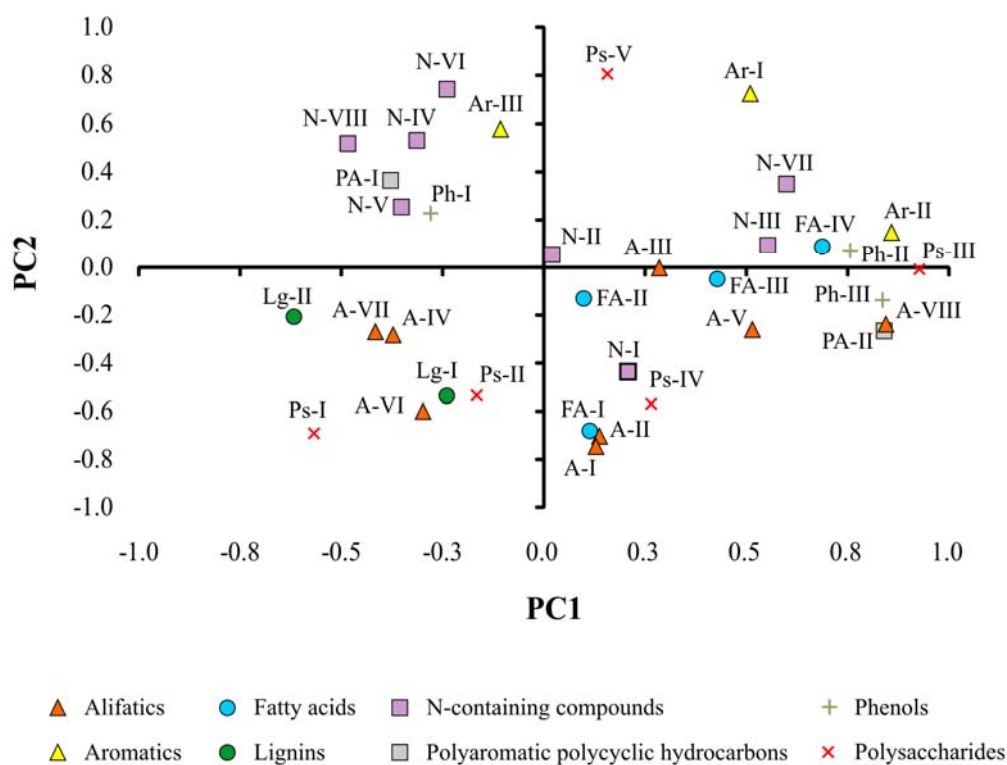


Figure 12. Factor loadings in PC1-PC2 space of recent topsoils (reduced data set). Explained variance for each factor, PC1 and PC2, was 23.7 and 19.8 %, respectively.

Combining Figures 11 and 12, it seems that the FOR soils under gorse, a leguminous plant, are widely different from the remainder. Two samples (2-go, 3-go) were characterized by high N contents, while the position of 1-go is largely determined by a high content of PAHs. This location was regularly burnt during the last 50 years, to promote the sprouting of a fresh plant cover more digestible to cattle. This practice may have caused the accumulation of PAHs compounds. It appears that frequent burning has not been applied to the other two gorse plots, although it was common practice in the preceding slash-and-burn system. Samples of tree FOR plots had both lower N contents and higher ligno-cellulose contents than those under gorse, but the differences between the four FOR plots were considerable.

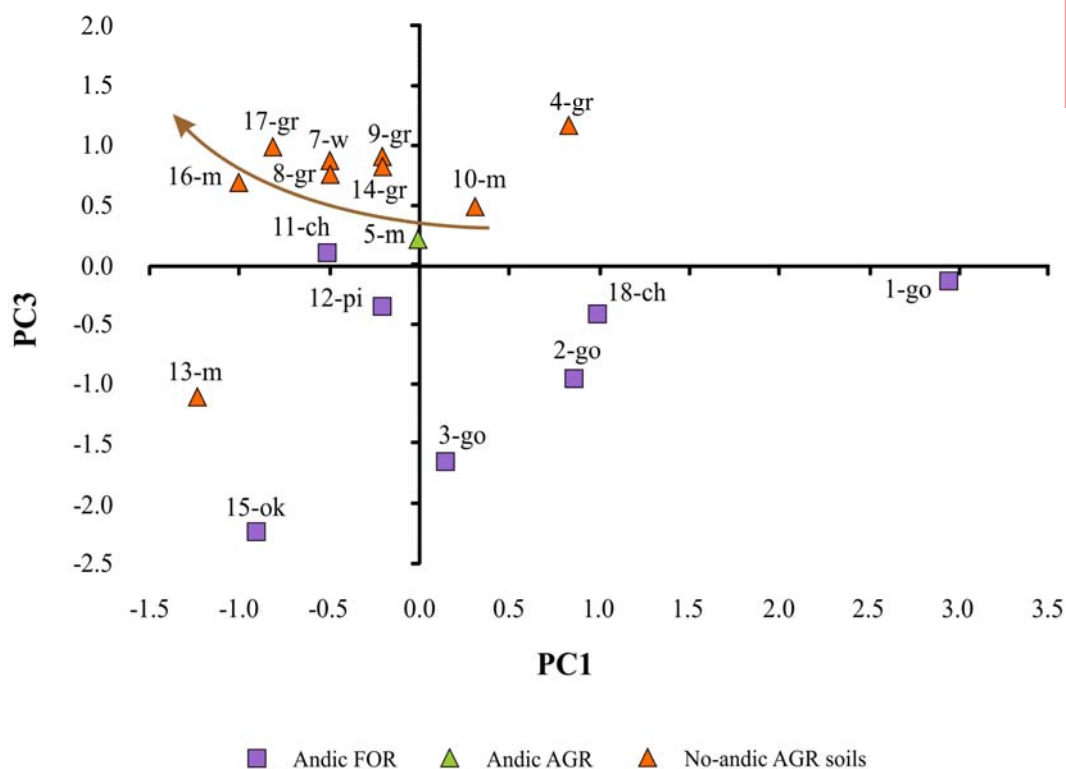
The establishment of tree species on FOR contributed significant amounts of lignin-cellulose-derived compounds. This seems to coincide with a decrease in chain length of the alkane/alkene groups (clusters A-I and A-II have largest negative scores on PC2), which chain length increases again in the AGR fields. The AGR soils shift towards the upper left quadrant with increasing time of cultivation, which may be an effect of N fertilization. Because in most cases except the gorse vegetation, the present vegetation or land use is less than half a century old, it is likely that the different plot histories still play a major role in present SOM chemistry.

The predominance of aliphatics in FOR soils, including the A-II group (Table 3), suggests that the origin of these compounds could be lipids of higher plants, as they are characterized by the presence of aliphatic chains with a C-number between  $C_{23}$  and  $C_{33}$  with odd-over-even dominance (Egliton & Hamilton, 1967). Alkanes and alkenes with chain lengths smaller than  $C_{23}$ , (groups A-III, VI, and VIII, Table 3), which are distributed in the same area as the AGR soils, indicate more or less intense degradation processes causing cleavage of longer chains and possibly favoured by the land use change (Meyers & Ishiwatari, 1993). The presence of unsaturated chains (n-alkenes), which would include an important part of the A-II group and the whole A-VII group, in the same area of the projection is attributed to the degradation of n-alkan-1-ols. The latter compounds have C chain lengths ranging between  $C_{18}$  and  $C_{26}$  and are commonly present as constituents of the lipidic fraction of woody plants (Rielley *et al.*, 1991).

The general relatively greater contribution of n-alkanes and n-alkenes in FOR soils (1.3-4.5%) than in AGR soils (1.0-3.3%) agrees with the findings by Nierop *et al.* (2007), who detected an accumulation of aliphatic compounds in Andisols. However, the environment they studied, i.e. high-altitude non-allophanic Andisols of the Andean Páramo, is very different from that of the present study. In contrast to our findings, Naafs (2004), Nierop *et al.* (2005), Buurman & Nierop (2007), and Buurman *et al.* (2007) found a decrease of aliphatics in the allophanic horizons of the Andisols that they studied. Nierop *et al.* (2007) suggested that divergences could be attributed to the different pH of the soils studied, as lipids tend to accumulate as pH decreases. In our study, the decrease of the relative abundance in aliphatics in AGR soils coincided with a small increase in soil pH (average pH = 5.0), mainly attributed to liming, again in agreement with the observation of Nierop *et al.* (2007). Nonetheless, the present data indicate that FOR soils under tree vegetation are richer in aliphatics than those under gorse or agriculture. Because all FOR soils under tree vegetation and gorse have andic properties, it appears that these differences are an effect of vegetation rather than of andic characteristics. Moreover, our results indicate that there was no residual accumulation of aliphatics after land use change (e.g.



after tillage), by preferential decomposition of more labile SOM fractions (e.g., polysaccharides). Finally, it should be noted that Pris-1-ene (A-IV) plots in the low negative part of PC2 (Figure 12) close to the AGR soils (Figure 12). Pris-1-ene originates from the oxidation of phytol side chains of the chlorophyll molecule, possibly through digestion by invertebrates, or just under oxidizing conditions (Ishiwatari *et al.*, 1991; Killops & Killops, 2005). The interpretation of this in the present context is not clear.



**Figure 13.** Factor scores in PC1-PC3 space of recent topsoil (reduced data set). The arrow indicates the trend of attenuation of andic properties in AGR soils after the land use change.

PC3 explained a 12.3 % of the total variance and thus PC1 and PC3 together explain 36 %. In the PC1-PC3 space (Figure 13), and especially on PC3, FOR soils were clearly separated from AGR soils. As before, the variation within the arable field was smaller than that of the native vegetations. Andic properties decrease in the direction of the arrow in Figure 13. As a result of the trends observed in this projection, we carried out a new PCA after eliminating those groups of variables that had (i) only been identified in a reduced number of samples and/or (ii) their quantification was not good enough, with the aim of reducing interferences and improving the projection of the samples in the PC1-PC3 space. We removed the Lg-I lignin group, constituted only by a single component (trans-4-(2-propenyl) guaiacol), which affected neither the percentage contribution to the explained variance (55.8 % in the first three factors, and 36.2 % considering PC1 and PC3) nor the

distribution of the components within the PC1-PC2 space (data not shown). The new projection obtained for the PC1-PC3 space was similar to the previous one (Figure 13); but soil samples clustered in more compact and better defined groups.

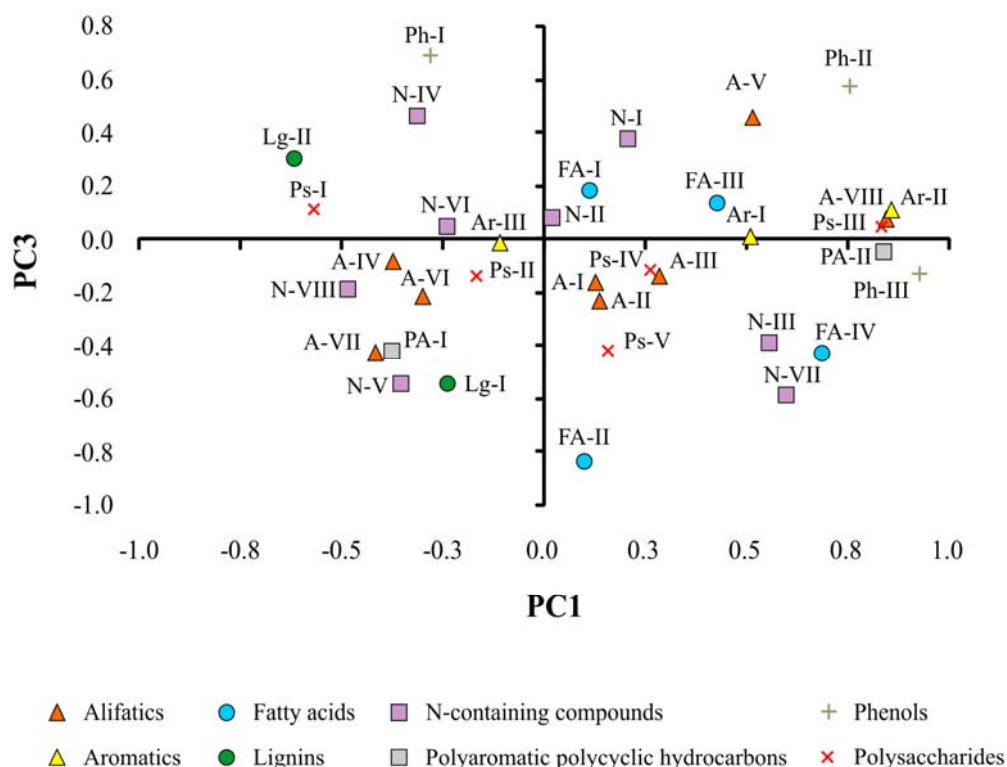
To understand the separation of the samples on both PC3 spaces (with and without Lg-I), we have to consult the loadings of the variable groups (Figure 14). As the separation on PC1 was discussed above, this will not be repeated. The upper left quadrangle, where most of the AGR soils plot, was largely defined by the markers of (relatively) fresh SOM, i.e. the levosugars (Ps-I) and the lignins (Lg-II), together with phenol and the N-IV group (indole and methylindole). In Andisols of Costa Rica (Buurman *et al.*, 2007), indole was associated with fresh litters and therefore it represents a clear primary component. Main groups with negative scores on both PC1 and PC3 in Figure 14 were the short alkanes/alkenes (A-VII), two probably microbial N-containing groups (N-V, VIII), and, with a slight positive score on PC1, the possibly microbial C<sub>14</sub> fatty acid (FA-II). Thus, after removing the Lg-I component the groups with largest loadings remain basically the same, but some changes were observed in the lower left quadrangle. The Ps-II component, which was previously not significant (a loading close to the zero for both factors), became the most important group in this space. The remaining groups, which previously plotted in this sector (Figure 14) shift towards the less negative area of the PC3 space, or even to the positive part of it (i.e. group N-VIII).

Combining the factor scores (Figure 13) with the corresponding factor loadings (Figure 14), it appears that the AGR soils are clearly different from soils with native vegetation (FOR soils), because of a larger fraction of fresh litter, probably as a result of ploughing. The removal of minor compounds changed the position of some samples in factor space. Sample 11-ch, which previously was positioned near to samples from AGR soils (Figure 13), shifted towards the 15-ok sample. This change is attributed to the change in loading of the Ps-II group. Soil 13-m shifted from the area close to FOR soils to a position between the FOR and AGR soils. In this case, this is explained by the new placement of N-VIII and A-VII groups (Figure 14). N-III (diketodipyrrole) and N-VII (methylpyridine and benzonitrile) groups appear to be related to the gorse vegetation.

Although ploughing, which was more effective than biological homogenization and brought fresh litter directly into the soil, was the major effect in AGR soils, other management practices may have influenced SOM composition. The AGR soils received mineral and organic fertilizers and other soil amendments (such as lime), which may have affected SOM through (i) the enhancement of microbial activity and thus, of SOM decomposition, after the addition of nutrients and amelioration of pH in dystrophic soils or (ii) the chemical changes induced by these amendments on Al/Fe-organic matter complexes, which supposedly protect SOM (Verde *et al.*, 2005). The marked negative loading of C<sub>14</sub> fatty acid (FA-II) on PC3 (Figure 14), which characterizes the soil under gorse (3-go and 2-go; Figure 13) especially, may indicate microbial population/activity as suggested under (i), although more research is needed to confirm this.

A typical fraction of the AGR surface horizons, and especially of those in which the land use change was carried out after 1960 (Table 1) - was that of lignin (Lg II) and phenol-compounds, distributed on the

negative side of PC1 and positive side of PC3 (Figure 14), with few loadings on PC2. Of the AGR soils, the long-term maize field was positioned on the extreme left in the factor scores diagram (Figure 11), which suggests that this cropping system supplied the largest amount of lignin to the soil. In the PC1-PC3 projection (Figure 14), lignin (Lg-II) projected in the upper left quadrant, again coinciding with the field cultivated since the 1960s.



**Figure 14.** Factor loadings in PC1-PC3 space for the actual topsoils (reduced data set). Explained variance for each factor, PC1 and PC3, was 23.7 and 12.3 %, respectively.

The fact that AGR soils had larger amounts of lignin and levosugars than FOR soils suggests that the accumulation/decay equilibrium in FOR soils tended more towards decay than in AGR soils. The mean polyphenol/lignin index (Lovato *et al.*, 2004) of AGR and FOR soils, 1.54 and 2.11, respectively (data not shown), corroborates this point. The gorse vegetation contributes significantly less fresh ligno-cellulose material to the soil than the AGR and tree FOR soils. The low relative presence of primary SOM derivative products, such as lignin and phenols (Figure 13 and 14) in the FOR soils with andic properties, coincides with the results obtained by Naafs (2004) and Nierop *et al.* (2005; 2007), Buurman & Nierop (2007) and Buurman *et al.* (2007) for allophanic soils and indicates that these compounds are quickly degraded in Andisols. In addition to the effect of ploughing, the higher amounts of lignin in AGR soils could result from (i) the impeded

degradation of lignin in the presence of high N fertilization (Fogg, 1988; Aber *et al.*, 1998; Carreiro *et al.*, 2000) and (ii) the use of a traditional AGR practice of the area, which is based on the use of shrubs - such as gorse - as cattle bedding, and use of the resulting mixture of litter and manure as a soil amendment. This practice would not only increase the input of lignified material but also that of N-compounds. The fact that SOM composition of FOR soils under gorse vegetation, particularly that of soil 3-go and 2-go (Figure 13), had a smaller relative abundance of lignin (8.4 %) compared with other FOR soils could be related to the practice of harvesting and later raking up of the soil surface for the elaboration of the cattle bedding. This would have probably minimized the input of surface litter and would also explain the relative increase of secondary degradation products (e.g., the relative abundance of polysaccharide compounds was 57.9 %).

FOR and AGR soils differed in the degree of oxidation of primary SOM products, particularly of the lignin-derived pyrolysis products. Mean values of the syringol/guaiacol ratio were significantly smaller (at  $P < 0.05$ ) in AGR soils ( $4.9 \pm 2.06$  %) than in FOR soils ( $11.2 \pm 6.98$  %). This could be at least partly explained as a consequence of the use of fire as an AGR management technique (slash-and-burn), as it is known that fire events can lead to a relative decrease of the syringol fraction (Rumpel *et al.*, 2007). Another plausible explanation for the decrease of syringols with respect to guaiacols could be a possible demethylation and subsequent dehydroxylation and/or demethoxylation of lignin (Kögel, 1986; Nierop, 2001), although it may also indicate a preferential degradation of syringyl lignin over guaiacyl lignin (van der Heijden & Boon, 1994). Overall, the results reflect the prominent decrease of syringol derived compounds with land use change, the effect of which increased in those samples in which the land use change took place during the 1950s (Table 1).

The present study indicates that AGR practices change SOM chemistry considerably. Non-andic AGR soils contain a larger fraction of primary (plant-derived) SOM than andic FOR soils. The trend of attenuation/loss of andic properties in the AGR soils studied increased from negative to positive scores on PC3 (Figure 13), and was accompanied by a decrease in aliphatics and an increase and ligno-cellulose compounds. The disruption of aggregates produced by soil tillage may lead to a greater availability of SOM, previously occluded within aggregates, to soil microflora, increasing its turnover rate (Lützow *et al.*, 2006). However, because two changes, i.e. the loss of andic properties and the supply of a chemically different litter, coincide, it is impossible to judge which changes results from each of these effects.

## 4. Conclusions

The extracted fractions clearly differentiate SOM characteristics of the three groups of soils studied and indicate the existence of a land use change effects at the molecular level. The SOM in buried soils, that do not have replenishment of fresh litter, gradually loses even its most stable plant-derived compounds such as lignin and long-chain aliphatics, and accumulates microbial-derived compounds. In recent surface soils, those with andic soil properties, mainly those under FOR use, were relatively enriched in aliphatics compared with AGR soils, but this (relative) enrichment may result from a larger supply of fresh ligno-cellulosic and N-rich material

in the AGR soils. Relative accumulation of ligno-cellulosic materials in AGR soils may be partly from the use of cut gorse as cattle bedding and the application of the bedding/manure mixture to agricultural fields.

The smaller relative abundance of primary SOM derivatives in andic FOR soils indicates that these compounds are quickly degraded in Andisols. Thus, the organic C lost because of land use change (from FOR to AGR use) mainly corresponded to secondary SOM fractions, such as aliphatics, there being a relative increase of primary markers, such as levosugars and lignin. The decrease in secondary SOM can be either (i) related to the destruction of organo-Al complexes (through changes in the physicochemical conditions of the soil systems with fertilizers and soil amendments) and the concomitant release of newly available SOM and/or (ii) through the enhanced microbial availability of secondary SOM after the disruption of aggregates by soil tillage. Nonetheless, this question remains unsolved. PAL soils displayed a pattern completely different from that of the above mentioned soils. They were characterized by an important relative contribution of polysaccharides and N-compounds, both probably of microbial origin, and the low contribution of compounds derived from fresh plant litter. Finally, the results obtained also suggest that repeated fire episodes, a practice commonly used to favour the sprouting of lignified vegetation and the liming of the soils with the ashes, produced a relative enrichment of PAHs, which resulted in a greater residence time for SOM.

## 5. Acknowledgments

We thank to the F.J. Gonzalez-Vila's team of "*Instituto de Recursos Naturales*" of CSIC (Sevilla), as well as Gonzalo Almendros (CSIC of Madrid), Rocío López (CSIC of Santiago de Compostela) and Joeri Kaal ("*Departamento de Edafología y Química Agrícola*" of University of Santiago de Compostela ) for their great technical and intellectual contributions.

## 6. References

- Aber, J., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, W., Rustad, L. & Fernandez, I. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revised. *Bioscience*, **48**, 921-934.
- Aran, D., Gury, M. & Jeanroy, E. 2001. Organo-metallic complex in an Andosol: a comparative study with a Cambisol and Podzol. *Geoderma*, **99**, 65-79.
- Boon, J.J. 1989. An introduction to Pyrolysis Mass Spectrometry of lignocellulosic material: Case studies on Barley straw, Corn stem and Agropyron. In: *Physico-chemical characterization of plant residues for industrial and feed use* (eds. A. Chesson, E.R. Ørsføv, 25-49. Elsevier Applied Science, London.
- Boudot, J.P., bel Hadj, B.A., Steiman, R. & Seigle-Murandi, F. 1989. Biodegradation of synthetic organo-metallic complex of iron and aluminium with selected metal to carbon ratios. *Soil Biology & Biochemistry*, **21**, 961-966.
- Bremner, J.M. 1967. The nitrogenous constituents of soil organic matter and their role in soil fertility. *Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia*, **32**, 143-193.
- Buurman, P. & Nierop, K.G.J. 2007. NaOH and Na-Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-extractable organic matter in two allophanic volcanic ash soils of the Azores Islands – quantified pyrolysis-GC/MS data and factor analysis. In: *Soils of Volcanic Regions in Europe*. O. Arnalds, F. Bartoli, P. Buurman, H. Oskarsson, G. Stoops & E. Garcia-Rodeja (Eds), pp 401-410. Springer, Berlin.
- Buurman, P., Peterse, F. & Almendros G. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils – A pyrolysis-GC/MS study of Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science*, **58**, 1330-1347.
- Camps Arbestain, M., Barreal, M. E. & Macías, F. 2001. Sulfate sorption in nonvolcanic Andisols and Andic soils from Galicia, NW Spain. *Geoderma*, **104**, 75-93.
- Carreiro, M.M., Sinsabaugh, R.L., Repert, D.A. & Parkhurst, D.G. 2000. Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, **81**, 2359-2365.
- Criado, F. & Ballesteros, P. 2002. La arqueología rural: contribución al estudio de la génesis y evolución del paisaje tradicional. *I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; Comisión de Medio Ambiente. Tomo I: 461 – 479. Madrid.
- Egliton, G. & Hamilton, R.J. 1967. Leaf Epicuticular Waxes. *Science*, **156**, 1322-1325.



- Fogg, K. 1988. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, **63**, 433-462.
- Galletti, G. C., Reeves III J. B., Francis B. A. & Reeves V. 1993. Ion trap and quadrupole mass spectra of lignin pyrolysates: How well do they compare? *Rapid Commun. Mass Spectrometry*, **7**, 641-645.
- García-Rodeja, E., Silva, B.M & Macías, F. 1987. Andosols developed from non-volcanic materials in Galicia, NW Spain. *European Journal of Soil Science*, **38(4)**, 573-591.
- Gleixner, G., Bol, R. & Balesdent, J. 1999. Molecular insight into soil carbon turnover. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **13**, 1278-1283.
- Gleixner, G., Poirier, N., Bol, R. & Balesdent, J. 2002. Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Organic Geochemistry*, **33**, 357-366.
- González-Pérez, J.A., Arbelo, C.D., González-Vila, F.J., Rodríguez Rodríguez, A., Almendros, G., Armas, C.M. & Polvillo, O. 2007. Molecular features of organic matter in diagnostic horizons from Andosols as seen by analytical pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **80**, 369-382.
- González-Vila, F.J., Almendros, G. & Tinoco, P. 2001. Nitrogen speciation and pyrolytic patterns of <sup>15</sup>N-labelled soil and compost fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **58-59**, 329-339.
- Gupta, N.S., Briggs, D.E.G., Collinson, M.E., Evershed, R.P., Michels, R. & Pancost, R.D. 2007. Molecular preservation of plant and insect cuticles from Oligocene Enspel Formation, Germany: Evidence against derivation of aliphatic polymer from sediment. *Organic Geochemistry*, **38**, 404-418.
- Hatcher, P.G. & Spiker, E.C., 1988. Selective degradation of plant biomolecules. In: *Humic Substances and their Rule in the Environment*. F.H. Frimmel and R.F. Christman (Eds.), pp. 59-74. Wiley, New York.
- Hempfling, R. & Schulten, H.R., 1989. Selective preservation of biomolecules during humification of forest litter studied by pyrolysis-field ionization mass spectrometry. *Science of Total Environment*, **81-82**, 31-40.
- Holloway, P.J. 1983. Some variations in the composition of suberin from the cork layers of higher plants. *Phytochemistry*, **22**, 495-502.
- Ishiwatari, M., Ishiwatari, R., Sakashita, H., Tatsumi, T. & Tominaga, H. 1991. Pyrolysis of chlorophyll a after preliminary heating at a moderate temperature: Implications for the origin of prist-1-ene on kerogen pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **18**, 128-207.
- Killops, S. & Killops, V. 2005. Introduction to Organic Geochemistry. *Blackwell Publishing*, pp. 393. Malden, USA.

- Kimber, R.W.L. & Searle, P.L. 1970a. Pyrolysis gas chromatography of soil organic matter. 1. Introduction and methodology. *Geoderma*, **4**, 47-55.
- Kimber, R.W.L. & Searle, P.L. 1970b. Pyrolysis gas chromatography of soil organic matter. 2. The effect of extractant and soil history on the yields of products from pyrolysis of humic acids. *Geoderma*, **4**, 57-71.
- Kögel, I., 1986. Estimation and decomposition pattern of the lignin component in forest humus layers. *Soil Biology & Biochemistry*, **18**, 589-594.
- Kögel-Knabner, I., Hatcher, P.G., Tegelaar, E.W. & de Leeuw, J.W. 1992. Aliphatic components of forest soil organic matter as determined by solid-state <sup>13</sup>C NMR and analytical pyrolysis. *Science of the Total Environment*, **113**, 89-106.
- Lien, Y.C. & Nawar, W.W. 1974. Thermal decomposition of some amino acids. 2. Alanine and  $\beta$ -alanine. *Journal of Food Science*, **39**, 914-916.
- Lovato, T., Mielniczuk, J., Bayer, C. & Vezzani, F. 2004. Adição de carbon e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **28**, 175-187.
- Lützow, M.V., Köger-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, **57**, 426-445.
- Macías, F., Puga, M. & Guitian Ojea, F. 1978. Caracteres ándicos en suelos sobre gabros de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología*. **37**, 187-203 A.
- Martin, F., Saiz-Jiménez, C. & Cert, A. 1979. Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry of humic fractions II. The high boiling point compounds. *Soil Science Society of American Journal*, **43**, 309-312.
- Martin, J.P. & Haider, K. 1986. Influence of minerals colloids on turnover rates of soil organic carbon. In: *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. *Soil Science Society of America*, Special Publication 17. (eds P.M. Huang & M. Schnitzer), pp. 283-304. ASA, Madison, WI.
- McGrath, T.E., Geoffrey, W.C. & Hajalipod, M.R. 2003. Low temperature mechanism for the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from the pyrolysis of cellulose. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **66**, 51-70.
- Meyers, P.A. & Ishiwatari, R. 1993. Lacustrine organic geochemistry — an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemistry*, **20**, 867-900.

- Naafs, D.F.W. 2004. What are humic substances? A molecular approach to the study of organic matter in acids soils. Doctoral dissertation, University of Utrech, Netherlands.
- Naafs, D.F.W., Nierop, K.G.J., van Bergen, P.F. & de Leeuw, J.W. 2005. Changes in the molecular composition of ester-bound aliphatics with depth in an acid andic forest soil. *Geoderma*, **127**, 130-136.
- Nierop, K.G.J. 2001. Temporal and vertical organic matter differentiation along a vegetation succession as revealed by pyrolysis and thermally assisted hydrolysis and methylation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **61**, 111-132.
- Nierop, K.G.J., van Bergen, P.F., Buurman, P. & van Lagen, B. 2005. NaOH and Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> extractable organic matter in two allophanic volcanic ash soils of the Azores Islands – a pyrolysis GC/MS study. *Geoderma*, **127**, 36-51.
- Nierop, K.G.J., Tonneijck, F.H., Jansen, B. & Verstraten, J.M. 2007. Organic matter in volcanic ash soils Ander forest and Páramo along an Ecuadorian altitudinal transect. *Soil Science Society of America Journal*, **71**, 1119-1127.
- Nikolaou, K., Masclet, P. & Mouvier, G. 1984. Sources and chemical reactivity of polynuclear aromatic hydrocarbons in the atmosphere – a critical review. *Science of Total Environment*, **32**, 103-132.
- Otto, A. & Simpson, M.J. 2006. Sources and composition of hydrolysable aliphatic lipids and phenols in soils from western Canada. *Organic Geochemistry*, **37**, 385-407.
- Parfitt, R.L., Theng, B.K.G., Whitton, J.S. & Shepherd, T.G. 1997. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, **75**, 1-12.
- Poirier, N., Sohi, S.P., Gaunt, J.L., Mahieu, N., Randall, E.W., Powlson, D.S. & Evershed, R.P. 2005. The chemical composition of measurable soil organic matter pools. *Organic Geochemistry*, **36**, 1174-1189.
- Quénéa, K., Derenne, S., Largeau, C., Rumpel, C. & Mariotti, A., 2006. Influence of change in land use on the refractory organic macromolecular fraction of a Sandy spodosol (Landes de Gascogne, France). *Geoderma*, **136**, 136-151.
- Ralph, J. & Hatfield, R.D. 1991 Pyrolysis-GC/MS characterization of forage materials. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, **39**, 1426-1437.
- Rielley, G., Collier, R.J., Jones, D.M. & Egliton, G. 1991. The biogeochemistry of Ellesmere Lake, U.K. — I: source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. *Organic Geochemistry*, **17**, 901-912.

- Rumpel, C., González-Pérez, J.A., Bardoux, G., Largeau, C., González-Vila, F.J. & Valentín, C. 2007. Composition and reactivity of morphologically charred materials left after slash-and-burn practices in agricultural tropical soils. *Organic Geochemistry*, **38**, 911-920.
- Saiz-Jiménez, C. & de Leeuw, J.W., 1984. Pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry of isolated, synthetic and degraded lignins. *Organic Geochemistry*, **6**, 417-422.
- Schnitzer, M. & Khan, S.U. 1972. Humic Substances in the Environment. Mercel Dekker, New York.
- Schnitzer, M., Hindle, C.A. & Meglic, M. 1986. Supercritical gas extraction of alkanes and alkanolic acids from soils and humic materials. *Soil Science Society of American Journal*, **50**, 913-919.
- Schnitzer, M. & Schulten, H.R. 1989. Pyrolysis-soft ionization mass spectrometry from a soil clay and humic substances. *The Science of the Total Environment*, **81-82**, 19-30.
- Sims, R.C. & Overcash, M.R. 1983. Fate of polynuclear aromatic compounds (PNAs) in soil-plant systems. *Residue Reviews*, **88**, 1-68.
- Soil Survey Staff, 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th ed. Agric. Handbk. 436. NRCS, Washington DC.
- Stanckiewicz, B.A., van Bergen, P.F., Smith, M.B., Carter, J.F., Briggs, D.E.G. & Evershed, R.P. 1998. Comparison of the analytical performance of filament and Curie-point pyrolysis devices. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **45**, 133-151.
- Stuczynski, T.I., McCarty, G.W., Reeves, J.B. & Wright, R.J. 1997. Use of Pyrolysis GC/MS for Assessing Changes in Soil Organic Matter Quality. *Soil Science*, **162**, 97-105.
- Suess, M.J. 1976. The environmental load and cycle of polyaromatics hydrocarbons. *Science of Total Environment*, **6**, 239-250.
- Tegelaar, E.W., De Leeuw, J.W. & Saiz-Jiménez, C., 1989. Possible origin of aliphatic moieties in humic substances. *Science of Total Environment*, **81-82**, 1-17.
- Telysheva, G., Dobelev, G., Meier, D., Dizhbite, T., Rossinska, G. & Kurkjane, V. 2007. Characterization of the transformations of lignocellulosic structures upon degradation in planted soils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **79**, 52-60.
- Thiele, S. & Brümmer, G.W. 2002. Bioformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil under oxygen deficit conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**, 733-735.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M. & Hendricks, D.M. 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*, **389**, 170-173.

- van Bergen, P.F., Bull, I.D., Poulton, P.R. & Evershed, R.P. 1997. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments. I. Total lipid extracts, solvent insoluble residues and humic acids from Broadbalk Wilderness. *Organic Geochemistry*, **26**, 117-135.
- van der Heijden, E. & Boon, J.J. 1994. A combined pyrolysis mass spectrometric and light microscopic study of peatified calluna wood isolated from raised bog peat deposits. *Organic Geochemistry*, **22**, 903-919.
- van der Kaaden, A. Boon, J.J., de Leeuw, J.W., Lange, F., Schuyl, P.J.W., Schulten, H.R. & Bahr, U. 1998. Comparison of analytical pyrolysis techniques in the characterization of chitin. *Analytical Chemistry*, **56**, 2160-2164.
- Verde, J.R., Camps Arbestain, M. & Macías, F. 2005. Expression of andic soil properties in soils from Galicia (NW Spain) under forest and agricultural use. *European Journal of Soil Science*, **56**, 63-66.
- Wada, K. & Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic material during the Quaternary. *Soil Science*, **116**, 170-177.
- Weete, J.D., 1976. Algal and fungal waxes. In: *Chemistry and Biochemistry of Natural Waxes* (ed. P.E. Kolattukudy), pp. 364-378. Elsevier, New York.
- Wershaw, R.L., Bohner, G.E. 1969. Pyrolysis of humic and fulvic acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **33**, 757-762.

# Chapter 7

---

*Final Conclusions*





# Chapter 7

## Final Conclusions.

---

### 1. Final Conclusions

1. The differences observed between the physiochemical and mineralogical properties, in soils developed over different parent materials, of basic and ultra basic characteristics, are determined in part by the composition of these materials, which evolution depends on the content of minerals easily weathered, as well as the climatic precipitation and temperature conditions, on which conditions depends the weathering processes, the primary production and the mineralisation level.

2. The existence of ombrothermic regimes with mild-humid or mild-very humid characteristics, with regimes of moist and temperature of udic and xeric, respectively, in areas with profiles developed over gabbros, amphibolites, granulites and gneisses are found, lead to an increase of the primary production, which explains the differences observed in the contents of C organic, significantly higher and major recalcitrance in this type of soils. The high precipitations combine with the mild temperatures during most part of the year and the high contents of organic matter of these soils, suggests that the weathering levels in these areas are higher than in those where the limited precipitations make the process of hydrolysis of the parent material more difficult, and slows down, because of this, the kinetic of the weathering process in soils over schist and serpentines located in hot areas of Portugal.

3. The increase of weathering levels would explain the presence of high quantities of all forms of Al, studied through the different techniques of selective dissolution, in profiles developed over amphibolites, gabbros, granulites and gneisses. The presence of reactive forms of Al, shown by the high values of  $pH_{NaF}$ , together with the high contents of organic C and the values of  $Al_p/Al_o$  close to 1 in these soils, suggests that the majority of Al is found forming part of the Al-humus complexes or short-range ordered minerals (allophane), shown in the mineralogical analysis of the clay fraction, this gives the soil's organic matter a certain level of protection against microbial degradation. This protection is reflected in the quantified quantities of C *No ox.* y C *dif. Ox.*, significantly higher in these type of soils.

---

4. The soils developed over Melide's serpentenic materials, even being subject to a humid ombrothermic regime, and similar conditions of hydric and thermic regimes, show quantities of reactive forms of Al and C organic significantly lower than the previously mentioned soils, due to, the absence of alumina-silicates in the parent material which would act as a source of Al during the weathering processes, and to the limitations of development of primary production of these soils, due most importantly to the presence of high quantities of  $Mg^{+2}$  in the exchange capacity complex (hypermagnesian soils) and, in most cases, to the toxicity caused by the presence of heavy metals. In serpentenic soils, the same as the ones developed over Portuguese schists, the weathering processes, as well as the primary production, are even more limited because of the fewer precipitations. The limited presence of Al-Humus complexes and short-range ordered minerals makes the majority of C organic to be found in forms easily oxidized, although there is a certain level of protection generally through the interaction of organic components with the silt soil fraction.

5. As a consequence of all this, the soils developed over gabbros together with the majority developed over amphibolites and granulites, are susceptible of being classified as Andosols according with WRB (2006) and ST (2006) because they meet with all the andic properties criteria established in these classification systems. The rest of these soils developed over these materials are classified as Umbrisols (WRB, 2006) and Inceptisols (ST, 2006), although a lot of them have some of the Andic properties, to the exception of Goiás profile I, because even having all the criteria for Andic properties, with a thickness of 10cm, it can only be classified as a Leptosol. These results suggest that the WRB (2006) classification should be included, moreover, the possibility to classify as Andosols the soils with  $Al_o + 1/2Fe_o > 2\%$ , independently of the thickness, creating a lithic subunit, to the soils with  $>1\%$  with andic subunits, with similar criteria to the Soil Taxonomy (1999). Finally, the serpentenic and schistic soils, due to their small development and thickness, are included within the Leptosol and Cambisol Orders, with the exception of Melide and Vilouriz's profiles which are included within the Umbrisol Order. Finally, the serpentenic and schistic soils, because of the limited level of development and thickness, are included in the Leptosol category according to WRB (2006) and Inceptisols category, according to ST (2006).

6. If we consider that the best criteria which represent the andic properties conditions is the  $Al_o + 1/2Fe_o$  index. Taking into account this index it is observed that the situations that allow the formation of these soils which exceeds the definition value of Andosols ( $> 2\%$ ) are only represented when there is a combination of soils developed on basic rock (amphibolites, gabbros, granulites or basic gneisses), only on horizons A (with a greater possibility on the horizons Ah2 versus Ah1) or AB and the hydric regime has an udic character. The xeric character eliminates all possibilities to reach values of  $Al_o + 1/2Fe_o$  close to 1.0, as demonstrated by the fact that starting from rocks with basic composition or ultrabasic, in Portuguese soils, this index never exceeds 0.5%. In udic conditions, the presence of serpentinized rocks with parent material, although some of the horizons developed on these materials can show values higher than 1.0, due to the fact that they can be rocks with very little or punctual serpentinization associated to fracture planes, the high hydromorphic conditions, advanced edaphic evolution and the cropping reduces or eliminates the importance of the andic character.

7. The differences observed in the  $Al_0+1/2Fe_0$  index as consequence of the lithological are reduced if we considered the relation between the parameters which value the extractable forms with oxalate among dithionite-citrate which would represent the percentage of the reactive forms to the total. In all cases, the percentage reflects the more reactive forms represent to the amphibolites between the 40 and the 75 % to A horizons and they are much lower to the B (10 - 60 %) horizons, but there are not difference between soils development onto gabbros and, curiously the higher percentage of the reactive forms produce in soils onto gneisses due principally to the high relative moist during the major part of the year although receive less average precipitation. The soils over schist and serpentines show values less than 40 % except the soils which receive the major quantity of precipitation. This suggest that this could be effect of the quantity of water over the weathering processes or, the most probable, a slightly metaphysic serpentinized rock. We considered that a relative index like the used to reactive forms versus totals can evidence more adequately the andic character, proposing that this index exceed 50 % for definition of Andosols and between 40 and 50 % for definition andic soils.

8. We found important changes in the properties of the surface horizons of andic soils following their conversion from shrub-forest systems with short periods of low-intensity cultivation (slash and burn agriculture) to modern agriculture with highly-intensive cultivation and fertilization. The main change is a marked decrease in OM and Al-humus complexes (indicated by a decrease in the  $Al_p$  and  $Al_{Cu}$  values), which has lead to the attenuation of, and in some cases, the disappearance of andic soil properties ( $Al_0+1/2Fe_0$ , phosphate retention, reactivity to fluoride).

9. Whereas FOR soils meet the criteria for either the definition of Andisols or Andosols or the andic subgroups of the *Dystrudepts*, the AGR soils show a progressive decrease in the degree of expression of the andic soil properties with time after conversion to modern AGR soil use. The Soil Taxonomy classification allows a better follow-up of these gradual changes than the WRB system. For this reason, we propose the modification of the definition of the formative element 'andic', to a less strict usage; its inclusion in the criteria would allow the definition of subunits of the Umbrisols, soils which have a much greater affinity, in terms of soil properties, with Andisols, than others such as Phaeozems, in which these subunits have been included.

10. The treatments carried out to alu-andic Andosol ,in laboratory conditions, throughout the simulation of different agricultural practices ( whitewashing, fertilization, tilling), and the simulation of the increase of temperature to 40C (linked to the lack of vegetation in agricultural soil) – all of them under abundant watering – have a clear effect in the pH and stability of the organo- aluminical complexes. This way, there is a tendency to increase the values of pH with thermal and whitewashing treatment and to the acidification with the fertilizing and tilling treatment, as well as, the leaching in control soil samples. In all cases, there is a negative effect in the organo-aluminic complexes stability as shown in the values of Al extracted in  $CuCl_2$ . With this, we can conclude that in all cases it favours the destruction of these complexes, independently of the acid-base tendencies, characteristic of these soils..

11. The most destructive treatment was to carry out thermal treatments at 40C once a week, which indicates that, with the simple elimination of vegetation coverage it can help the lost of Andic properties, but the maximum destruction occurs with the simultaneous execution of all the agricultural practices studied( tilling, liming, fertilisation and heat).

12. Also it is significant that all treatments reduce the possibilities of formation of metaestables phases of low level order, in other words, all treatments lead to the decrease of the andic soil properties, through the decrease of the high labile organoaluminic complexes, and of the decreasing of the possibilities of formation and metastability of aluminisilicated and aluminohydroxilated forms of low range order, whose sobresaturation of Al in dissolution is strongly reduced.

13. We don't know the existence of any scientific studies in this matter; therefore we believe that studies should be carried out in this direction, specially taking into account the implications of the stabilization of carbon within the Tokyo Protocol framework.

14. Desconocemos la existencia de trabajos científicos sobre esta cuestión, por lo que creemos que se deberían llevar a cabo estudios en esta dirección, sobre todo teniendo en cuenta las implicaciones que tiene la estabilización de carbono dentro del marco del Protocolo de Kyoto.

15. The extracted fractions clearly differentiate SOM characteristics of the three groups of soils studied and indicate the existence of a land use change effects at the molecular level. The SOM in buried soils, that do not have replenishment of fresh litter, gradually loses even its most stable plant-derived compounds such as lignin and long-chain aliphatics, and accumulates microbial-derived compounds. In recent surface soils, those with andic soil properties, mainly those under FOR use, were relatively enriched in aliphatics compared with AGR soils, but this (relative) enrichment may result from a larger supply of fresh ligno-cellulosic and N-rich material in the AGR soils. Relative accumulation of ligno-cellulosic materials in AGR soils may be partly from the use of cut gorse as cattle bedding and the application of the bedding/manure mixture to agricultural fields.

16. The smaller relative abundance of primary SOM derivatives in andic FOR soils indicates that these compounds are quickly degraded in Andisols. Thus, the organic C lost because of land use change (from FOR to AGR use) mainly corresponded to secondary SOM fractions, such as aliphatics, there being a relative increase of primary markers, such as levosugars and lignin. The decrease in secondary SOM can be either (i) related to the destruction of organo-Al complexes (through changes in the physicochemical conditions of the soil systems with fertilizers and soil amendments) and the concomitant release of newly available SOM and/or (ii) through the enhanced microbial availability of secondary SOM after the disruption of aggregates by soil tillage. Nonetheless, this question remains unsolved. PAL soils displayed a pattern completely different from that of the above mentioned soils. They were characterized by an important relative contribution of polysaccharides and N-compounds, both probably of microbial origin, and the low contribution of compounds derived from fresh plant litter.

17. Finally, the results obtained also suggest that repeated fire episodes, a practice commonly used to favour the sprouting of lignified vegetation and the liming of the soils with the ashes, produced a relative enrichment of PAHs, which resulted in a greater residence time for SOM.



